

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Erna Fučić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.

Studentica:

Erna Fučić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. Damiru Markučiću na velikoj podršci, strpljenju i savjetima tokom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i svim asistentima i laboratorijima kod kojih sam radila, na njihovoj dobrodošlici i nesebičnoj suradnji. Veliko hvala upućujem NDT odjelu Croatia Airlines, za dijeljenje znanja, vještina, opreme i uzoraka, kojima su i omogućili izradu ovog rada.

Erna Fučić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Erna Fučić**

Mat. br.: 0035177158

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerne tehnike vizualne metode nerazornih ispitivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Remote visual inspection measurement techniques**

Opis zadatka:

Vizualna metoda nerazornog ispitivanja u širokoj je primjeni na komponentama zrakoplovnih konstrukcija. Iznimno je važna u proizvodnji, ali posebice u periodičnim pregledima tijekom uporabe zrakoplova. Obzirom na složenost konstrukcije zrakoplova, opreme i motora, odnosno za pregled mjesta koja su nedostupna oku, od posebne je važnosti primjena posredne tehnike vizualnoga pregleda (*Remote Visual Inspection, RVI*) korištenjem posebne opreme.

U prvome dijelu rada potrebno je usporedno prikazati tehnike, uređaje i načela rada endoskopskih ispitivanja koja se koriste u održavanju zrakoplova s posebnim osvrtom na tehničke značajke opreme i mogućnosti kvantificiranja pronađenih površinskih nepravilnosti. Posebnu pozornost posvetiti tehnici temeljenoj na načelu 3D faznog mjerenja površinskih nepravilnosti.

U eksperimentalnome dijelu rada potrebno je osmisliti protokol te provesti ispitivanja i mjerenja s dostupnom endoskopskom opremom na odabranim uzorcima. Dobivene rezultate usporediti s rezultatima drugih optičkih konvencionalnih mjernih metoda u svrhu analize mjernih mogućnosti i ograničenja endoskopskih tehnika mjerenja površinskih nepravilnosti obzirom na značajke samih nepravilnosti i obzirom na tehničke značajke korištene opreme. Komentirati značaj i ulogu računalnih alata koji se koriste za kvantificiranje značajki površinskih nepravilnosti.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

10. ožujka 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

12. svibnja 2016.

Predviđeni datumi obrane:

18., 19. i 20. svibnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	VI
SAŽETAK	VII
1. Uvod	1
1.1 Remote Visual Inspection – posredna tehnika vizualne metode ispitivanja	2
1.2. Dosadašnje ispitne metode i tehnologija	7
2. Metoda 3D faznog mjerenja	12
2.1 Primjena metode 3D faznog mjerenja	17
2.2 Pravilni odabir metode	22
2.3 Greške u 3D faznom mjerenju	23
3. Istraživanje	24
3.1 Uzorci	24
3.2. Ispitna područja	28
3.3. Ispitivanja i rezultati	30
3.3.1 Ispitivanje povećalom	30
3.3.2 Ispitivanje mjernim mikroskopom	31
3.3.3 RVI – metoda 3D faznog mjerenja i stereo mjerenja	33
3.3.4 Metoda računalne tomografije	42
4. Analiza rezultata	46
5. Zaključak	49
6. LITERATURA	50

POPIS SLIKA

Slika 1. Presjek boroskopa [4]	4
Slika 2. Presjek fibroskopa [4]	5
Slika 3. Presjek videoscopa [4]	6
Slika 4. Prikaz usporedbene metode mjerenja [6]	7
Slika 5. Prikaz principa rada mjerenja metodom sjenčanja [6]	8
Slika 6. Prikaz projiciranja sjene tokom mjerenja metodom sjenčanja [8]	8
Slika 7. Primjer očitavanja dubine na objektu ispitivanja metodom sjenčanja [8]	9
Slika 8. Prikaz principa rada stereo metode mjerenja [6]	10
Slika 9. Prikaz projiciranja svijetla tokom stereo metoda mjerenja [8]	10
Slika 10. Primjer očitavanja dužine oštećenja primjenom stereo metode mjerenja [8]	11
Slika 11. Distalni završeci za ravno i kutno snimanje; 1 – CCD kamera, 2 – rešetkasti uzorak, 3 – standardni osvjetljavajući sustav [10]	13
Slika 12. Shema projiciranja interferencijskih linija pomoću rešetkastog uzorka za 3D fazno mjerenje [10]	13
Slika 13. Metoda računanja udaljenosti probe od ispitivane površine [10]	14
Slika 14. Primjer očitavanja dužine oštećenja na dovodnoj lopatici statora [15]	18
Slika 15. Primjer očitavanja udaljenosti definirane točke od nekog pravca [15]	19
Slika 16. Primjer očitavanja prethodno definirane površine [15]	19
Slika 17. Primjer očitavanja dubine oštećenja, sa pripadajućom kartom određenih ravnina (<i>slices</i>) za različite dubine [15]	20
Slika 18. Primjer očitavanja oštećenja 'oblakom točaka', uz usporedbu sa neoštećenim 3D modelom ispitivanog objekta [15]	20
Slika 19. Primjer očitavanja dubine oštećenja turbinske lopatice i profilni prikaz mjere [15]	21
Slika 20. Primjer očitavanja lokalne nakupine materijala ('ekcem') na turbinskoj lopatici [15]	21
Slika 21. Prikaz kvalitativnog odabira metode mjerenja u odnosu na uvjete [16]	22

Slika 22. Očitavanje dubine oštećenja u odnosu na zadanu ravninu, dok je u 3D vidljivo da je oštećenje uleknuto [16]	23
Slika 23. Očitavanje dužine pod pretpostavkom da je označena najkraća udaljenost dvaju točaka, dok je u 3D prikazu vidljivo da je linija postavljena pod nekim kutem [16]	23
Slika 24. Ispitni Uzorak 1	25
Slika 25. Ispitni Uzorak 2	26
Slika 26. Uzorci nakon obrade	27
Slika 27. Uzorci 1 i 2 sa oznakama područja a, b, c na kojima se provodi dio ispitivanja (mjerno povećalo, 3D fazno mjerenje, stereo metoda mjerenja, računalna tomografija)	28
Slika 28. Uzorci 1 i 2 sa oznakama područja na kojima se provodi dio ispitivanja (univerzalni mjerni mikroskop)	29
Slika 29. Očitavanje dimenzije širina oštećenja Carton scale povećalom	30
Slika 30. Uzorak 1 i oznake za mjesta očitavanja širine utora - oštećenja mikroskopom	31
Slika 31. Uzorak 2 i oznake za mjesta očitavanja širine utora - oštećenja mikroskopom	32
Slika 32. Prikaz postupka očitavanja mjera sa Uzorka 1 u programu RLS MerOpt	32
Slika 33. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]	35
Slika 34. Prikaz profila dubine za – point line očitavanje, [mm]	35
Slika 35. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]	36
Slika 36. Prikaz profila dubine za – point line očitavanje, [mm]	36
Slika 37. Očitavanje dubine oštećenja – depth, [mm]	37
Slika 38. Prikaz karte područja različitih dubina, -depth, [mm]	37
Slika 39. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]	38
Slika 40. Prikaz profila dubine za – point line očitavanje, [mm]	38
Slika 41. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]	39
Slika 42. Očitavanje dubine stereo mjerenjem, [μm]	39
Slika 43. Očitavanje dužine pukotine, - point line, [mm]	40

Slika 44. Očitavanje dužine, širine i dubine pukotine, - point line, [mm]	40
Slika 45. Prikaz rendgenske snimke uzorka i označavanja oštećenja prije očitavanja	42
Slika 46. Očitavanje širine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]	43
Slika 47. Očitavanje dubine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]	43
Slika 48. Očitavanje širine oštećenja iz Y-Z ravnine, [mm]	44
Slika 49. Očitavanje širine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]	44
Slika 50. Očitavanje dubine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]	45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Nazivne dimenzije simuliranih oštećenja na Uzorku 1	25
Tablica 2. Nazivne dimenzije simuliranih oštećenja na Uzorku 2	26
Tablica 3. Kemijski sastav materijala Uzoraka 1 i 2	27
Tablica 4. Dimenzije širina oštećenja na uzorcima 1 i 2	30
Tablica 5. Izmjerene dimenzije oštećenja za Uzorak 1	31
Tablica 6. Izmjerene dimenzije oštećenja za Uzorak 2	32
Tablica 7. Očitane dimenzije oštećenja 3D faznim i stereo mjerenjem	41
Tablica 8. Očitane dimenzije oštećenja na više mjesta, na Uzorku 1, korištenjem rendgenske metode	45
Tablica 9. Prikaz rezultata mjerenja na Uzorku 1-a	46
Tablica 10. Prikaz rezultata mjerenja na Uzorku 1-b	46
Tablica 11. Prikaz rezultata mjerenja na Uzorku 2-c	47
Tablica 12. Prikaz rezultata mjerenja na statoru	47

SAŽETAK

Svako izuzimanje zrakoplova iz eksploatacije, radi potrebe održavanja, dovodi do finansijskih gubitaka aviokompanije. Zbog toga se održavanje zrakoplova osmišljava i provodi u što kraćem mogućem vremenu, a veliki udio pregleda provodi se posrednom tehnikom vizualne metode ispitivanja (*RVI – Remote Visual Inspection*). Cilj ovog rada je ispitati mogućnosti videoscopa GE XLG3 VideoProbe, koji koristi novu tehnologiju 3D faznog mjerenja, na umjetno stvorenim, i stvarnim, uzorcima oštećenja. U radu su korištene posredne tehnike vizualnih metoda ispitivanja, te računalna tomografija. Rezultati su pokazali da metoda 3D faznog mjerenja zadovoljava uvjet brzog, preciznog i kvalitetnog očitavanja oštećenja komponenti zrakoplova.

Ključne riječi: održavanje zrakoplova, posredna tehnika vizualne metode ispitivanja, videoskop, 3D fazno mjerenje

SUMMARY

Each aircraft maintenance phase entails a certain amount of financial loss for an airline. This is the main reason why aircraft maintenance is always carefully time- and cost-efficiently planned, which implies a considerable application of Remote Visual Inspection (RVI). The aim of this thesis is to evaluate the abilities of the videoscope GE XLG3 VideoProbe, which utilizes a new 3D phase measurement technology, upon artificially damaged samples and actual damaged aircraft components. The thesis also includes other RVI measuring methods, along with computed tomography. The results show that the 3D phase measurement technology qualifies as a fast, precise and reliable method for evaluation of damaged aircraft components.

Key words: aircraft maintenance, Remote Visual Inspection, videoscope, 3D phase measurement

1. Uvod

U zrakoplovnoj industriji, vrijeme u kojem je zrakoplov izuzet iz eksploatacije, predstavlja financijske gubitke za tvrtku. Stoga se održavanje zrakoplova osmišljava i provodi u najkraćem mogućem vremenu, što za posljedicu ima ograničeni vremenski okvir za otkrivanje i popravak eventualnih nedostataka i oštećenja. U okviru radova na održavanju zrakoplova, jedna od bitnih sastavnica procesa je i ispitivanje oštećenja zrakoplova i njegovih komponenata, koje se provodi u svrhu procjenjivanja opsega i vrste popravka. S obzirom na ograničeno vrijeme za održavanje, neprestano se razvija nova ili unapređuje postojeća ispitna oprema i tehnike koje omogućuju ubrzavanje postupaka ispitivanja, uz uvjet osiguravanja dostatne pouzdanosti rezultata s obzirom na visoke zahtjeve sigurnosti u zrakoplovnoj industriji.

U današnje vrijeme se za 70-80% ispitivanja konstrukcije zrakoplova, oplata, podvozja te komponenti pogonskih jedinica koristi niz metoda nerazornih ispitivanja (u daljnjem tekstu NDT metode – prema engl. *Non – Destructive Testing*) [1] :

- penetrantska
- magnetska
- vrtložne struje
- ultrazvučna
- radiografska
- vizualna (Remote Visual Inspection (RVI) - posredna metoda vizualnog pregleda)
- akustička
- termografska

1.1 Remote Visual Inspection – posredna tehnika vizualne metode ispitivanja

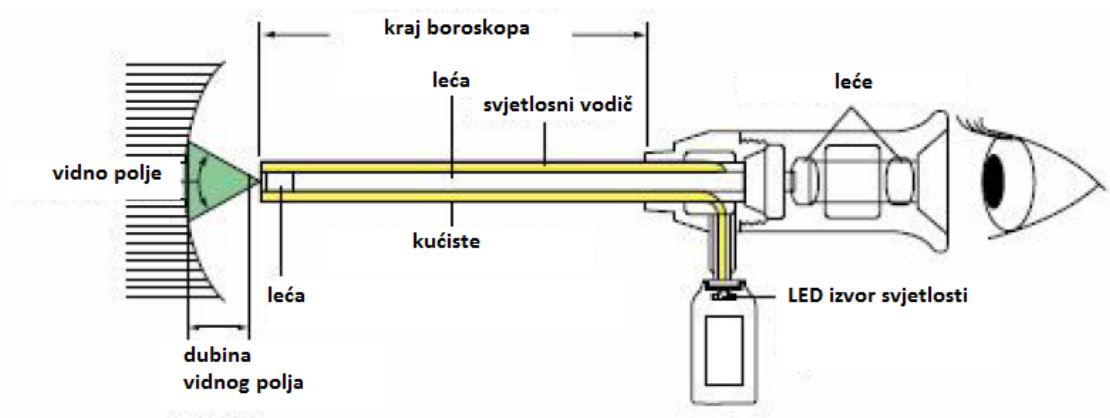
Remote Visual Inspection (u nastavku rada RVI) tj. posredna tehnika vizualne metode ispitivanja je u širokoj primjeni na komponentama zrakoplovnih konstrukcija, a iznimno je pogodna za pregled mjesta koja su nedostupna oku. Prema poznatoj statistici, čak do 80% pregleda u zrakoplovstvu se provodi nekom vrstom vizualnog pregleda [3], i ta je metoda pregleda najčešće prva NDT metoda koja se koristi u svakom procesu održavanja zrakoplova. Vizualni pregled jednostavan je za korištenje, oprema nije složena, ispitivanje se brzo provodi, te se oštećenja relativno lako uočavaju. Poznata je činjenica da se otprilike 60% nepravilnosti tokom održavanja zrakoplova uoči upravo zahvaljujući posrednoj ili neposrednoj metodi vizualnog pregleda [3]. Temeljem tih početnih ispitivanja u procesu održavanja zrakoplova na uočenom mjestu oštećenja mogu se dodatno provoditi i detaljnija ispitivanja drugim, prethodno navedenim, NDT metodama [1,2].

Posredna tehnika vizualne metode ispitivanja se koristi za uočavanje isključivo površinskih oštećenja zrakoplovnih komponenata od različitih materijala, koje se nalaze unutar zrakoplovne konstrukcije, primjerice na području podvozja, spremnika, oplata, a vrlo često i unutar motora [2].

Bilo kakav pregled površine na udaljenosti većoj od 600mm, s ili bez optičkog instrumenta kao pomagala, pripada u skupinu posrednih tehnika vizualne metode pregleda [4]. Kod RVI metode optički su instrumenti pomagala i/ili uređaji koji povećavaju, osvjetljavaju, te čak obrađuju sliku površine koju ispitivač pregledava.

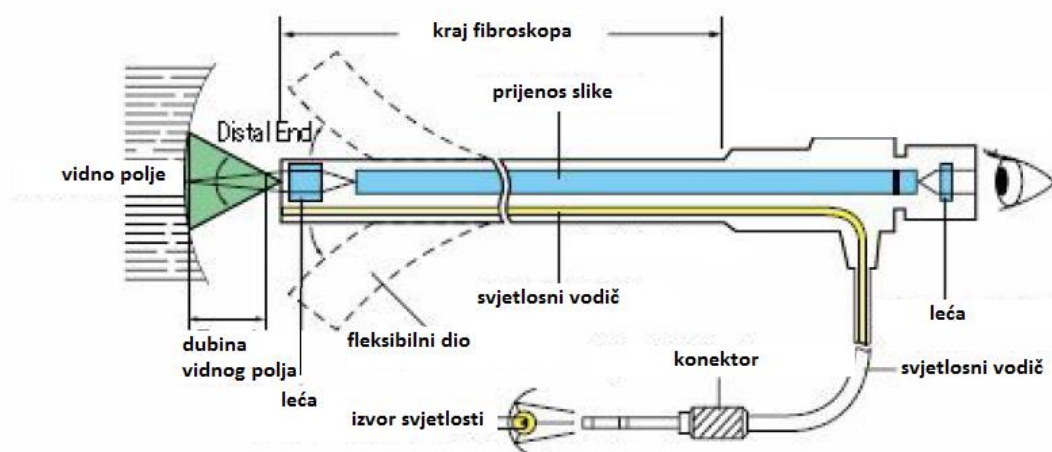
Optički uređaji koji se koriste za RVI metodu su endoskopi, koji se mogu podijeliti na boroskope (čvrsto kućište), fibroskope (fleksibilno kućište) i videoskope [4]. Oni se koriste za detektiranje, kvantificiranje i mjerenje oštećenja elemenata konstrukcije i komponenata zrakoplova. Njihova primjena u održavanju zrakoplovnih motora je ključna zbog laganog pristupa njihovoj unutrašnjosti i sastavnim dijelovima za brzo, efikasno i ekonomično periodično održavanje. Najčešće se koriste za uočavanje propuštanja tekućine, korozijskih i površinskih pukotina, te provjeru zazora i prepoznavanje blokiranih kanala [5]. Osnovne komponente uređaja za RVI su leća i izvor svjetlosti, povezani kroz produžetak kojim se prenosi slika, završno s lećom za oko ispitivača [4].

Boroskopi se sastoje od čvrstog kućišta, izvora svjetlosti i niza leća koje prenose svjetlost i omogućavaju uvećavanje slike promatranog dijela konstrukcije. Iako im je upotreba jednostavna, njihova je primjena ograničena najčešće na ispitivanje ravnih cijevi i sličnih elemenata u zrakoplovnoj konstrukciji. Dužina im varira od 15 cm do 30 m, sa promjerom od 0.9 mm do 70 mm. Vidno polje ima raspon od 10° do 90° , ovisno o tome je li na kraju fiksirana ili rotirajući distalni završetak. Uobičajeno povećanje leća je 4X, no postoje i posebni modeli sa povećanjem do 50X. Većina ovih boroskopa dolazi sa nepromjenjivom vrijednosti fokusa [2].



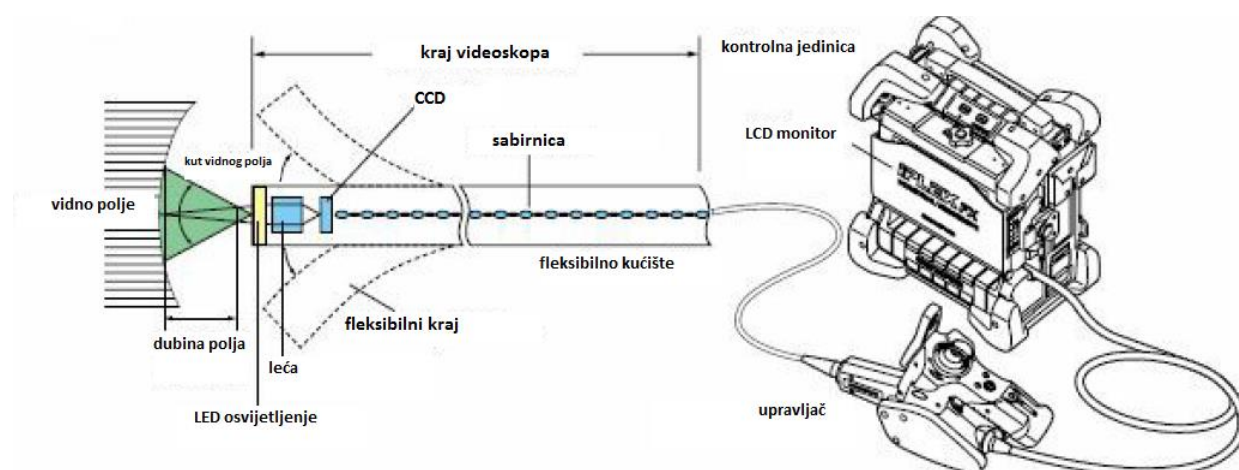
Slika 1. Presjek boroskopa [4]

Fibroskopi se sastoje od fleksibilnog kućišta nekoherentnog snopa svjetlosnih vlakana – svjetlosnog vodiča, koji prenose svjetlost od njezinog izvora do područja osvjetljenja, i koherentnog snopa svjetlosnih vlakana – vodiča za prijenos slike, koji prenose sliku ispitivanog područja do ispitivača. Distalni završetak su im zamjenjive prema potrebi ispitivanja, te imaju ugrađen sustav za njihovo rotiranje prema potrebi pregleda ispitivača. Također, distalne završetak fibroskopa imaju mogućnost podesive vrijednosti fokusa. Dužina određenih modela fibroskopa je do 12 m, a promjer im je od 1.4 do 13 mm [2]. Kvalitetno operativno vidno polje je u rasponu od 0° do 90° , no određene distalne leće mogu ostvariti vidno polje i do 120° , pod uvjetom manjeg uvećanja slike [5].



Slika 2. Presjek fibroskopa [4]

Videoskopi su opremljeni sa fleksibilnim kućištem, koje sadrži sabirnicu kojom se prenosi informacija o slici ispitivanog područja, te se ona zapisuje na CCD (*Charged Coupled Device*) ili CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) kameru. Rezolucija slike kod videoskopa ovisi o udaljenosti ispitivane površine od distalne leće, te vidnom polju, a ta dva parametra utječu na vrijednosti uvećavanja slike i dostupne površine za pregled. Prednost videoskopa je što eliminiraju iskrivljenje slike i zamor oka ispitivača (prikaz ispitivanog područja je na zaslonu), te mogućnost zapisa slika za ponovno ispitivanje [2]. Vrijednosti i ograničenja vidnog polja videoskopa su ista kao i kod fibroskopa [5].



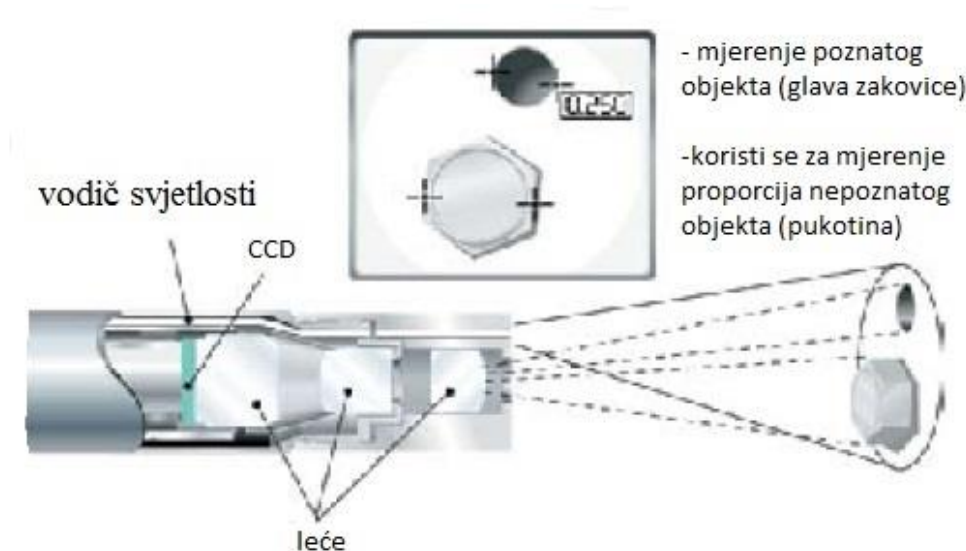
Slika 3. Presjek videoskopa [4]

1.2. Dosadašnje ispitne metode i tehnologija

U tehnici endoskopske inspekcije za mjerenja se koriste usporedbeni metoda, stereo metoda i metoda sjenčanja [6].

Usporedbeni metoda mjerenja

Usporedbeni metoda mjerenja temelji se na referentnoj dimenziji koja je uklopljena u sliku ispitivane lokacije, te se koristi za mjerenje objekata u istom vidnom polju i ravnini. Točnost ovog načina ispitivanja ovisi o udaljenosti distalnog završetka endoskopa od promatranog objekta, te do koje mjere je ravnina objekta okomita na os endoskopskog distalnog završetka [6].

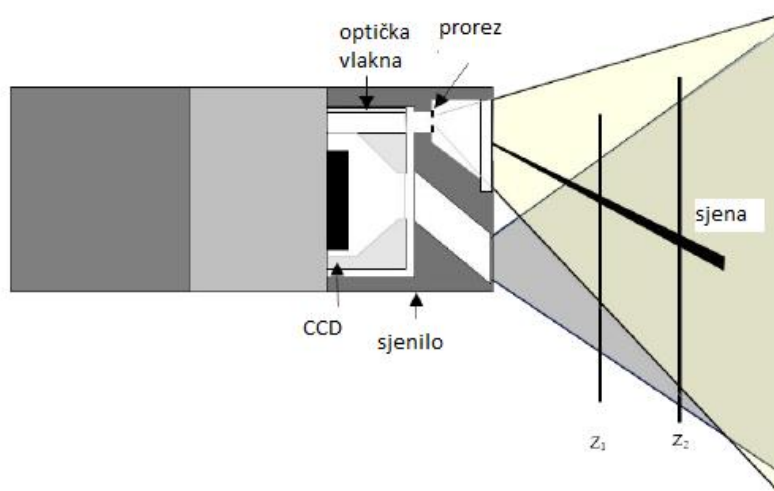


Slika 4. Prikaz usporedbene metode mjerenja [6]

Ovom metodom moguće je na ispitivanom objektu izmjeriti slijedeće značajke: dužinu, dužinu više segmenata, površinu, udaljenost i promjer oštećenja [8].

Mjerenje metodom sjenčanja

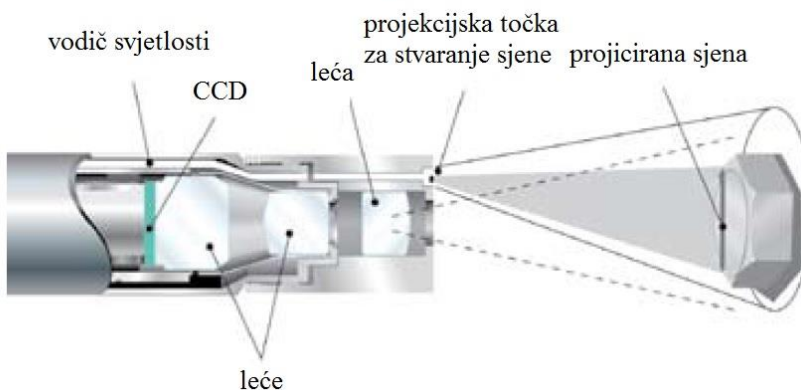
Metoda sjenčanja temelji se na triangulaciji sjene, udaljenosti vrha distalnog završetka i ciljanog objekta. Distalni završetak videoskopa stvara sjenu preko slike koja se ispituje, a njezina pozicija ovisi o udaljenosti distalnog završetka videoskopa i ciljanog objekta. Ovom metodom može se dosta precizno očitati mjere promatranih značajki objekta koje je ispitivač sam odabrao i označio. Točnost ove tehnike ovisi o udaljenosti objekta od distalnog završetka videoskopa [5].



Slika 5. Prikaz principa rada mjerenja metodom sjenčanja [6]

Na Slici 5. vrijednosti Z_1 i Z_2 se koriste za mjeru dubinske oštine, koja varira u odnosu na kut pada svjetlosti [7].

Ovom metodom moguće je na ispitivanom objektu izmjeriti slijedeće značajke: udaljenost, iskošenost, dubinu, dužinu više segmenata, površinu i promjer oštećenja [8].



Slika 6. Prikaz projiciranja sjene tokom mjerenja metodom sjenčanja [8]

Mjerenje metodom sjenčanja je zahtjevno, te se mora paziti na nekoliko uvjeta za postizanje što preciznijih očitavanja mjera :

- vrh videoskopa mora biti pozicioniran što bliže promatranom objektu, tako da se u rubu vidnog polja nalazi rub površine koja se želi ispitati
- očitavanje mjere se može ostvariti čak i ako se doima da je slika izvan fokusa, dokle god su značajke ispitivane površine dovoljno oštre da se mogu na njih pozicionirati ispitne točke
- za očitavanje dubine oštećenja, distalni završetak se mora postaviti toliko blizu da se donekle projicirana sjena 'slomi', kako bi sustav očitavanja mogao razlikovati reljef (Slika 7.)
- projicirana sjena mora biti na istoj ravnini na kojoj je i oštećenje koje se želi očitati [9].

Uzimajući navedene zahtjevne uvjete u obzir, mjerenje metodom sjenčanja može kvalitetno očitati mjere relativno malih oštećenja (raspon vidnog polja do 50°, dubina vidnog polja je od 7 mm do 30 mm), a vjerojatnost krivog očitavanja je visoka u slučaju neravne površine, ili nepravilnog postavljanja distalnog završetka u odnosu na površinu [10].

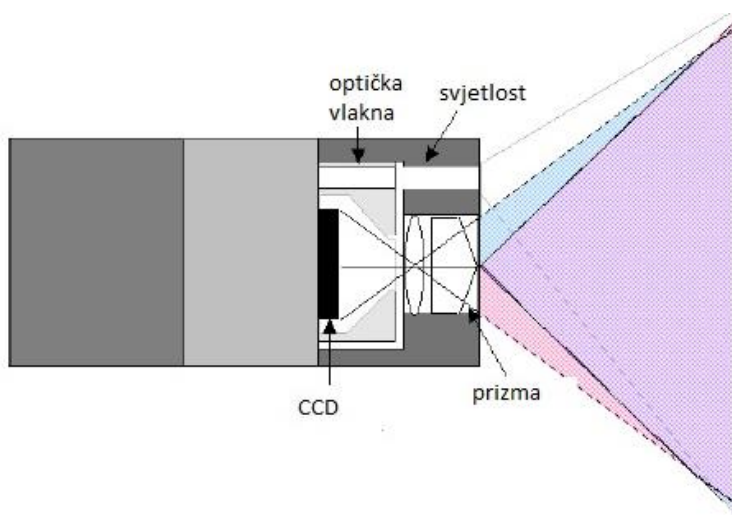
U novije vrijeme, u zrakoplovstvu se ova metoda pokazala jako pouzdanom za mjerenje dimenzija provrta i rupa na mikro-skali, poput unutrašnjosti sapnica goriva u mlaznom motoru [11].



Slika 7. Primjer očitavanja dubine na objektu ispitivanja metodom sjenčanja [8]

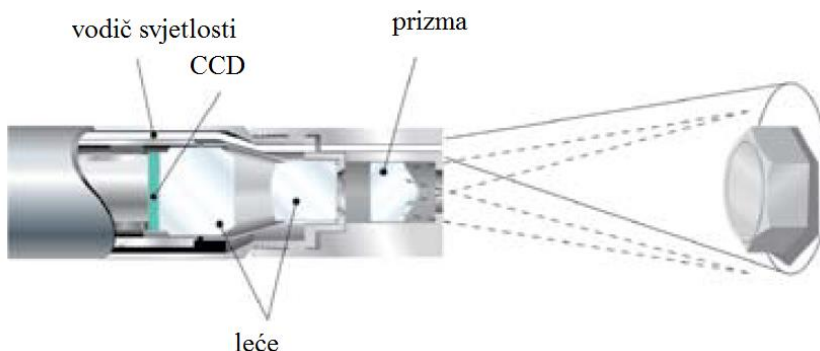
Stereo metoda mjerenja

Stereo metoda koristi prizmatične ili dvostruke leće kojima se slika dijeli, što omogućuje kameri lijevi i desni pogled na objekt s poznatim kutem separacije slike. Ispitivač proizvoljno odabire točke koje računalo analizira određenim algoritmom i triangulacijskom geometrijom, što rezultira izmjerama objekta. Točnost izmjera ovisi o separacijskoj udaljenosti prizmatične ili dvostruke leće, o ošttrini i kontrastu slika, te udaljenosti objekta od distalnog završetka videoskopa. Točnost ne ovisi o mjeri okomitosti objekta na ravninu videoskopske distalnog završetka [6].



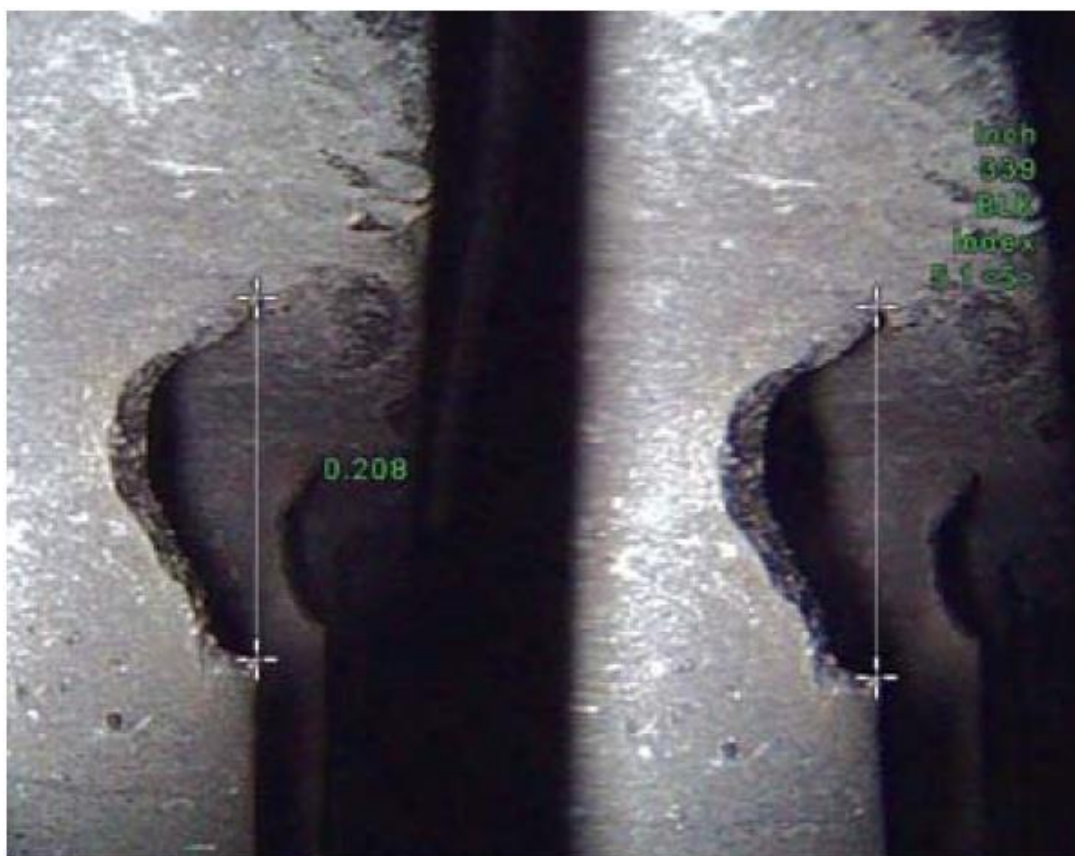
Slika 8. Prikaz principa rada stereo metode mjerenja [6]

Ovom metodom moguće je na ispitivanom objektu izmjeriti: dužinu, dužinu više segmenata, dubinu, udaljenost i površinu oštećenja [8].



Slika 9. Prikaz projiciranja svjetla tokom stereo metoda mjerenja [8]

Stereo metoda mjerenja ima mogućnost 3D mjerenja, no nema mogućnost prikaza oštećenja u obliku 3D 'oblaka točaka' (*point cloud*), kao što će se dalje opisati kao svojstvo metode 3D faznog mjerenja (Poglavlje 2.). S obzirom da se ova metoda temelji na točnoj korelaciji dvaju karakterističnih odabranih točaka na lijevoj i desnoj slici stereo mjerenja, problem u kvalitetnom očitavanju mjera može nastati kada se na slici ne mogu očitati dovoljno dobro vidljive referentne točke. Drugi nedostatak stereo metode mjerenja je, upravo radi svojstvene dvojne slike, smanjena vrijednost vidnog polja od 45° do 60°, te ujedno i smanjene vrijednosti dubine vidnog polja raspona od 2 mm do 80 mm. Ove činjenice produžuju vrijeme rada sa stereo metodom mjerenja, i ograničavaju područja ispitivanja na očitavanje osnovnih mjera manjih oštećenja [10].



Slika 10. Primjer očitavanja dužine oštećenja primjenom stereo metode mjerenja [8]

2. Metoda 3D faznog mjerenja

U prethodno navedenim endoskopskim metodama mjerenja, vjerojatnost uspješnih rezultata mjerenja je varijabilna, i dosta ovisi o pozicioniranju distalnog završetka endoskopa u odnosu na ispitivani objekt, o osvjetljenju površine objekta, stanju i boji površine objekta, te o znanju, vještinama i kompetencijama samog ispitivača.

Nova tehnologija razvijena 2010. godine [12], uvela je 3D tehniku skeniranja površine koja očitava trodimenzionalni oblik oštećenja i sprema u digitalni zapis [10]. Tehnika je primijenjena u videoskopski uređaj GE XLG3 VideoProbe [13], a metoda mjerenja je temeljena na rezultatima koji se dobivaju uslijed faznog pomaka valova svjetlosti kojima se generiraju 3D modeli ispitivanih objekata što omogućuje očitavanje mjera i geometrija oštećenja s dostatnom preciznošću.

Distalni završetak ovog videoskopa sastoji se od leće umetnute u rešetkasto ležište – difrakcijska leća – gdje razmještaj i dimenzije rešetke definiraju uzorak statičkih interferencijskih linija, s poznatim parametrima, koje se projiciraju na površinu ispitivanog objekta [10].

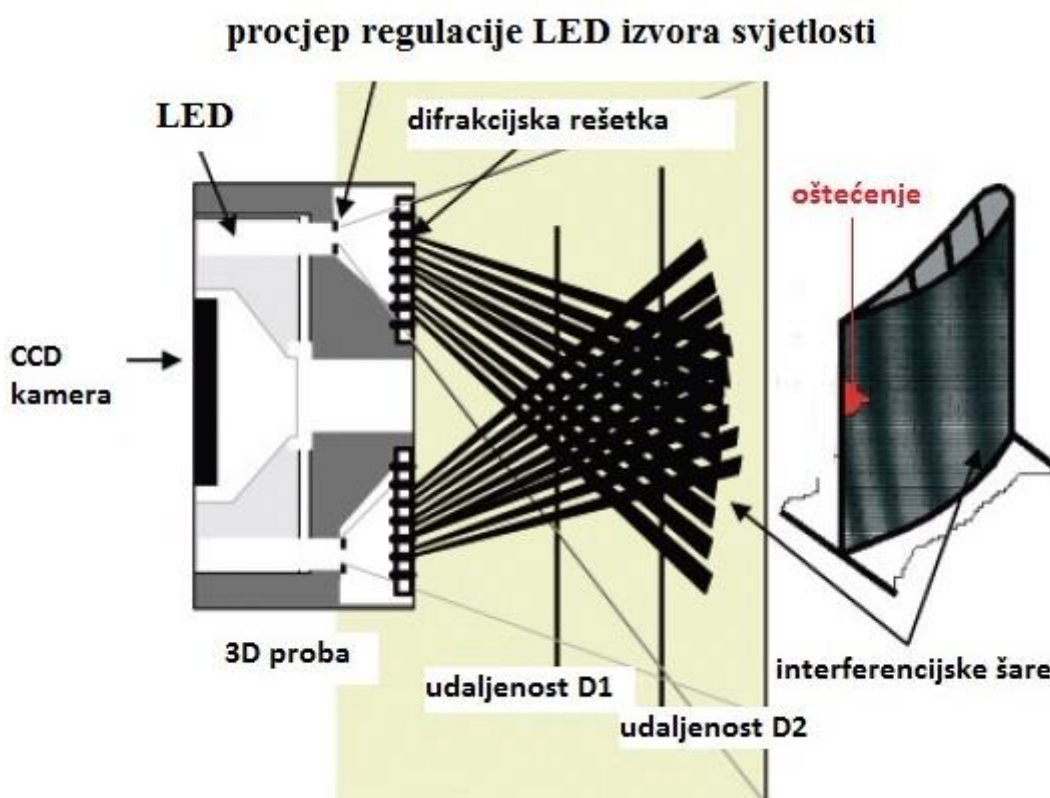
Projiciran uzorak linija mora se nalaziti unutar vidnog polja CCD kamere, koja posebnim algoritmom iz niza 2D uzorkovanih slika, omogućuje triangulacijsko rekonstruiranje 3D slike ispitivanog objekta u formi 'oblaka točaka' (*point cloud*) – matrice točaka sa poznatim X, Y i Z koordinatama svake od njih.

Uz rešetkasto ležište i CCD kameru, unutar distalnog završetka se nalazi i standardni osvjetljavajući sustav (75W, 4300lm) [13]. Taj sustav radi samo kod regularnog pregledavanja objekata, no on se automatski gasi kada se uključuje 3D sustav za fazno mjerenje, kako bi se postigla najkvalitetnija moguća rezolucija rešetkastog uzorka na površini za što preciznije mjerenje. Iza rešetkastog dijela distalnog završetka ugrađeni su diodni izvori svjetlosti (LED) s poznatim duljinama valova [10].



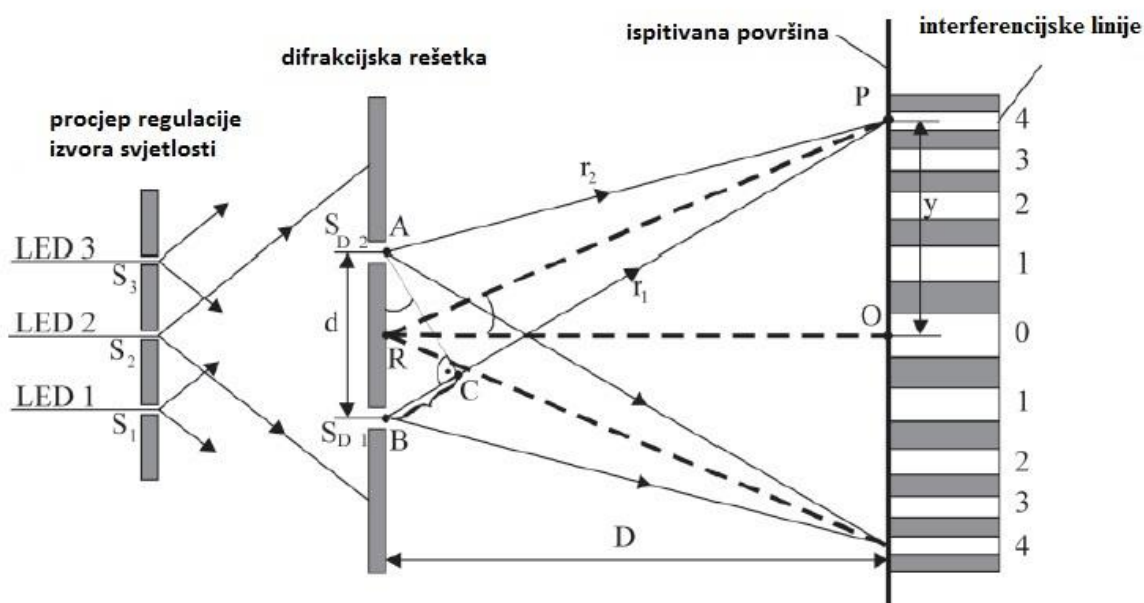
Slika 11. Distalni završeci za ravno i kutno snimanje; 1 – CCD kamera, 2 – rešetkasti uzorak, 3 – standardni osvjetljavajući sustav [10]

Ukoliko dolazi do promjene udaljenosti distalnog završetka od ispitivanog objekta, doći će i do promjene uzorka i intenziteta interferencijskih linija projiciranih na površinu tog objekta, što je prikazano na Slici 12 [10].



Slika 12. Shema projiciranja interferencijskih linija pomoću rešetkastog uzorka za 3D fazno mjerenje [10]

Očitane dimenzije promatranog oštećenja na objektu nisu samo funkcija realnih dimenzija tog oštećenja, već i udaljenosti distalnog završetka od promatranog objekta, a to predstavlja temeljni problem u mjerenju pomoću 3D tehnike mjerenja. Zbog ovog razloga se uvodi metoda faznog mjerenja, temeljena na teoriji T. Young-a, koji je definirao da su svjetlosni valovi transversalni, te je otkrio njihovu difrakciju i interferenciju (Young-ov pokus) [14].



Slika 13. Metoda računanja udaljenosti probe od ispitivane površine [10]

Kako je prikazano na shemi na Slici 13, tri LED izvora svjetlosti redom emitiraju monokromatske, nekoherentne svjetlosne valove (valove jednake valne duljine, koji se pojavljuju u različitim, vremenski ovisnim, faznim pomacima). Ti svjetlosni valovi prolaze kroz dva difrakcijska prolaza, na procjepu regulacije izvora svjetlosti - za pretvaranje u monokromatske koherentne valove, i na difrakcijskoj rešetki – za projiciranje uzorka svijetlih i tamnih interferencijskih linija, istog intenziteta, na površinu ispitivanog objekta [10].

Ako se prema Slici 13, uzme da oznaka D označava udaljenost leće distalnog završetka, i da je ona znatno veća od procjepa d difrakcijske rešetke ($D \gg d$), može se pretpostaviti da je dužina AC približno okomita na put svjetla r_1 i r_2 . Tada se također može pretpostaviti da je kut ABC približno jednak kutu PRO (kasnije označen sa α). Prema tome se može definirati dužina razmaka između puta svjetlosti uzrokovanih faznim pomakom, slijedećom formulom (1):

$$BC = \Delta r = d \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

Time se može i predvidjeti pojava svijetle linije na ispitivanoj površini (2):

$$d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda \quad (2)$$

gdje je $n = 1, 2, 3 \dots$ redoslijed pojave interferencijske šare.

Pojava tamne linije u interferencijskom uzorku se definira sa (3):

$$d \cdot \sin \alpha = (2n + 1) \cdot \lambda / 2 \quad (3)$$

gdje je $n = 1, 2, 3 \dots$ redoslijed pojave interferencijske šare [10].

To znači, da ako se očekuje pojava tamne interferencijske šare na mjestu točke P na Slici 13, tada fazna razlika između emitiranih svjetlosnih valova mora biti jednaka neparnom umnošku polovice valne duljine (3). S obzirom da se kut otklona α , pri kojem se stvaraju svijetle interferencijske šare, uvećava za svaki točan interferencijski broj, njegova sinus funkcija također raste, čime se može odrediti udaljenost (y) između pojedinih šara u uzorku na površini ispitivanog objekta [10].

U slučaju stvaranja stabilnog i oštrog uzorka interferencijskih šara na površini ispitivanog uzorka, moguće je vrlo precizno izmjeriti udaljenost svake šare od nulte šare, a uz poznavanje valne duljine λ emitiranog svjetlosnog vala, te konstante d difrakcijske rešetke, moguće je izmjeriti udaljenost distalnog završetka od ispitivane površine objekta, D , čija je jednadžba prikazana u (5) :

$$d \cdot \frac{y}{\sqrt{D^2 + y^2}} = n \cdot \lambda \quad (4)$$

$$D = y \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{n \cdot \lambda}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

Radi postizanja visoke preciznosti u očitavanju, rešetke distalnog završetka moraju biti najkvalitetnije tehnološki obrađene. Također, obavezni uvjet koji se mora ispuniti za stabilan uzorak interferencijskih šara, je i osiguravanje monokromatskog i koherentnog izvora svjetlosti [10].

Svjetlosni valovi koje emitiraju LED svjetlosni izvori na distalnom završetku su monokromatski (imaju istu valnu duljinu λ), međutim nisu koherentni – emitiraju spektar različitih valnih duljina (tj. frekvencija) koje su različitih amplituda i pomaka u fazi. Radi toga se ispred LED svjetlosnih izvora stavljaju procjepi regulacije izvora svjetlosti (Slika 13.), jer temeljem Huygen-sovog teorema, valovi koji prođu takve difrakcijske proreze, međusobno će imati konstantnu faznu razliku. Projicirane interferencijske linije će se otklanjati na površini ispitivanog objekta, ovisno o geometriji, dakle na području gdje se nalazi više materijala će se linije otkloniti ulijevo, a na području gdje je manje materijala će se linije otkloniti udesno. Taj uzorak na površini ispitivanog objekta zapisati će CCD kamera u matričnom obliku. Procesna jedinica videoscopa identificira i lokalizira pojedine zapisane linije, te provodi usporedbenu analizu faznog pomaka poznate emitirane svjetlosti i zapisanih parametara. Tokom analize uzima se u obzir kalibracija kamere i smjer projekcije, a rezultat je 3D 'oblak točaka' koji prikazuje ispitivano oštećenje, sa poznatom koordinatom X,Y i Z svake od točaka [10].

2.1 Primjena metode 3D faznog mjerenja

Ova svojevrsna nova generacija videoscopa, korištenjem metode 3D faznog mjerenja ima više prednosti u odnosu na prijašnje uređaje i metode. Prvenstveno, sustav 3D faznog mjerenja ne zahtjeva mijenjanje iz kvalitativne (stvaranje slike) u kvantitativnu analizu (mjerenje), što podrazumijeva povlačenje probe i mijenjanje tipa distalnog završetka. To skraćuje vrijeme potrebno za provođenje ispitivanja, te se sprječava problem mimoilaženja inicijalno zamijećenog oštećenja ponovnim uvođenjem probe i pregledom površine objekta. Također, poznato je da distalni završeci korišteni za mjerenje kod starijih uređaja i metoda imaju manje dubine vidnog polja (skraćeno DOF od *depth-of-field*). Tako se, na primjer, za metodu mjerenja sjenčanjem koriste distalni završeci sa dubinom vidnog polja od 7 mm do 30 mm, dok se kod metode faznog mjerenja koriste distalni završeci sa dubinom vidnog polja od 7 do 250 mm [10].

Glavni nedostatak sustava za 3D fazno mjerenje je velika osjetljivost na vibracije. Tehnikom 3D faznog mjerenja mora se provesti akvizicija više slika za što je potrebno cca 2 sekunde - iz toga proizlazi zahtjev da za to vrijeme akvizicije (ili eksponiranja) ne bi smjelo biti pomicanja niti vibracija, kako ispitnog objekta tako i samog videoscopa, odnosno njegovog distalnog završetka. Stoga je potrebno osigurati neku vrstu oslonca i mirovanja endoscopa i distalnog završetka kako bi se izbjegla eventualna "nemirnost" ruke ispitivača [10].

Međutim, usprkos tom nedostatku, primjena uređaja GE XLG3 VideoProbe i metode 3D faznog mjerenja ima veliku prednost za ispitivanje slijedećih dijelova:

klipni motori:

- ležajevi cilindara
- ventili
- usisni i ispušni vodovi
- dijelovi turbokompresora

mlazni motori:

- dijelovi kompresora i turbine
- komora izgaranja

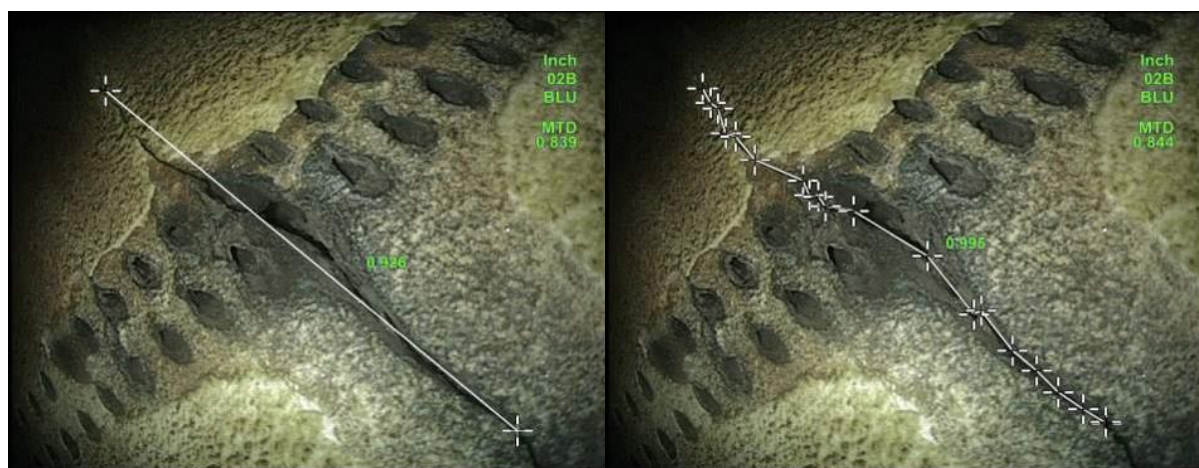
U mlaznim motorima se ovom metodom jednostavnije pregledava sveukupna geometrija dijelova statora i rotora turbine i kompresora, stanje svake lopatice pojedinačno, te zazori u odnosu na stjenku motora [10].

Prednost kod ispitivanja GE XLG3 videoskopom je i softverski paket instaliran na uređaj, s LCD ekranom. Jedna od inačica koju softver nudi je indikator kvalitete mjerenja, koji postane crven na LCD ekranu, trenutno upozoravajući ispitivača da će imati netočno očitavanje mjera ako ne prilagodi uvjete ispitivanja (pojava vibracija, nedovoljno osvijetljena ispitna površina). Također, uređaj dolazi sa popratnim softverskim paketom za računalo, GE Inspection Manager v.06, u kojem se slike i analize oštećenja mogu učitati, te ponovno analizirati [10].

Značajke koje sustav može analizirati su sljedeće:

- dužina: pukotine, erozija, korozija, habanje
- dužina više segmenata: prati cijelu specifičnu putanju pukotine
- udaljenost: oštećenja napadnog ruba turbinske lopatice, procjepi, zavari
- površina: trošenje prevlake, rupičasta korozija, FOD (*Foreign object damage*)
- dubina: vrh turbinske lopatice do kućišta, izolirano korozijsko oštećenje, promjer unutrašnjosti cijevi, FOD [10]

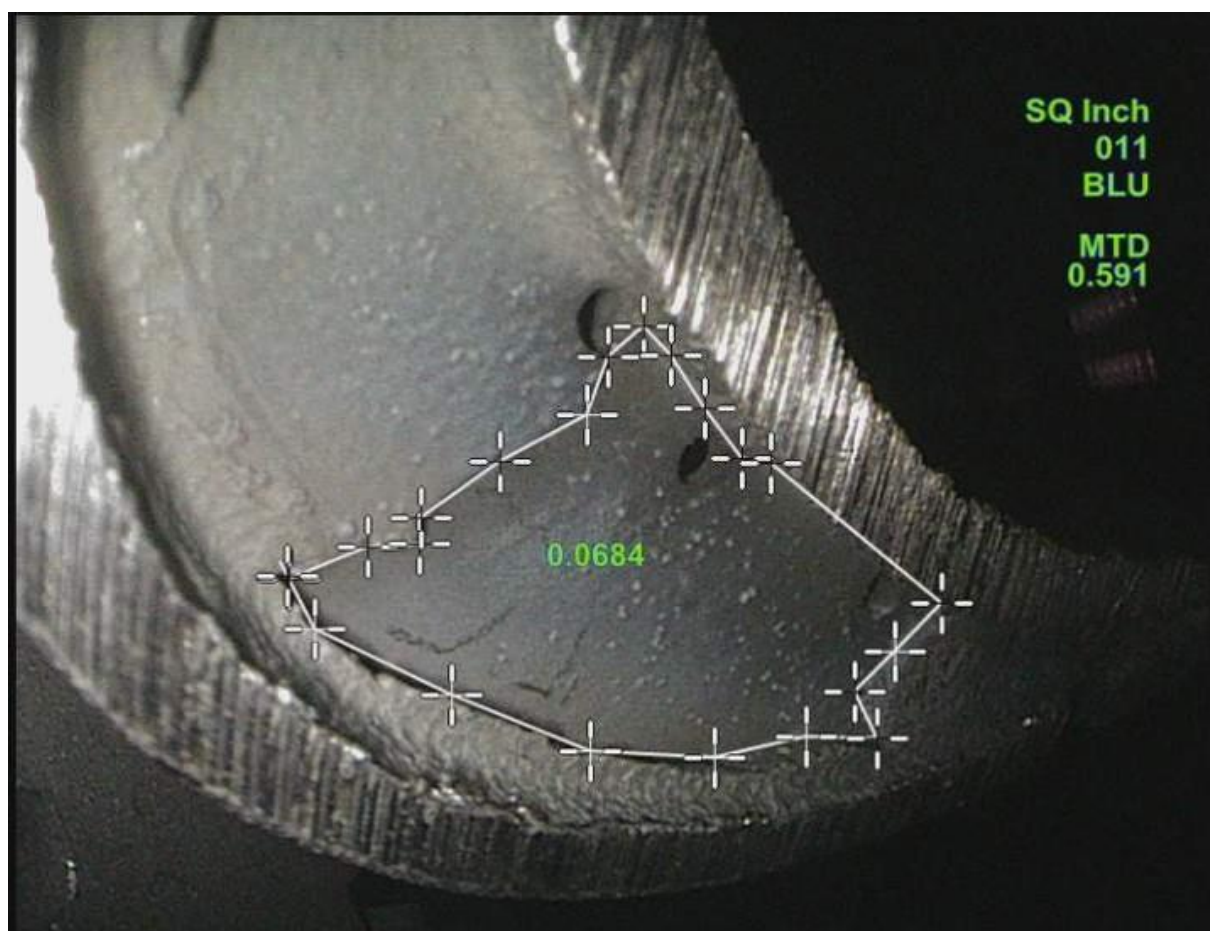
Primjeri ovih mjera koje sustav može očitati su na sljedećim slikama (Slika 14-20).



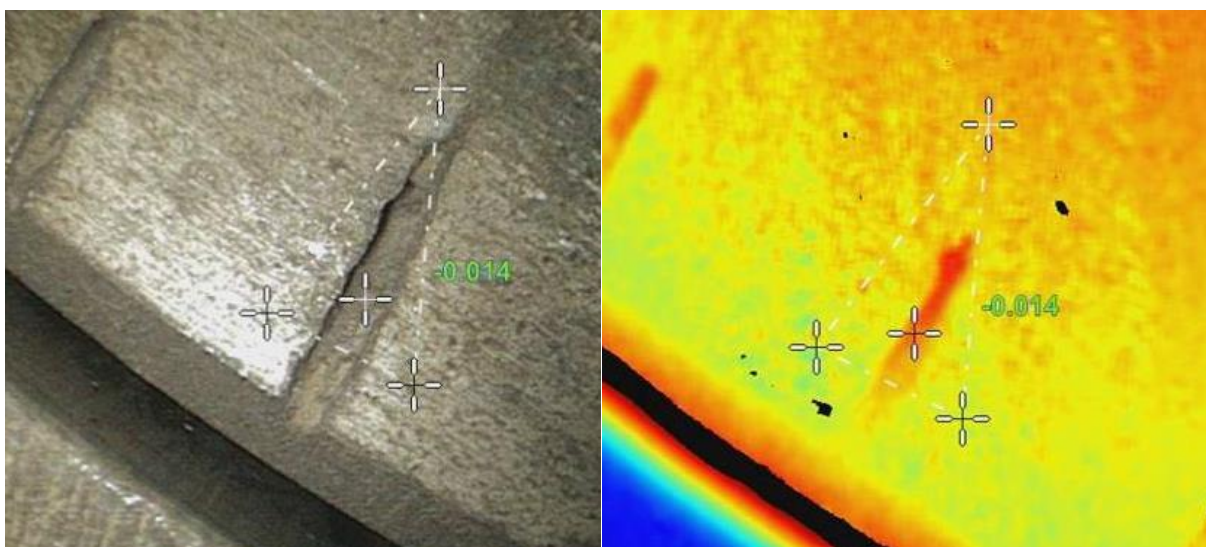
Slika 14. Primjer očitavanja dužine oštećenja na dovodnoj lopatici statora [15]



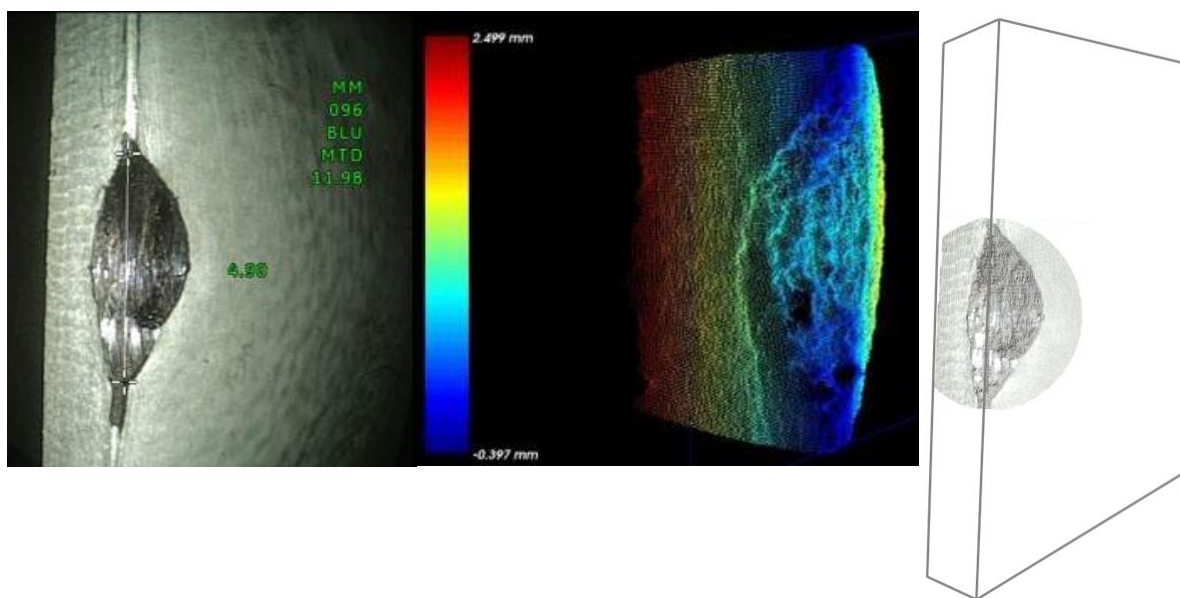
Slika 15. Primjer očitavanja udaljenosti definirane točke od nekog pravca [15]



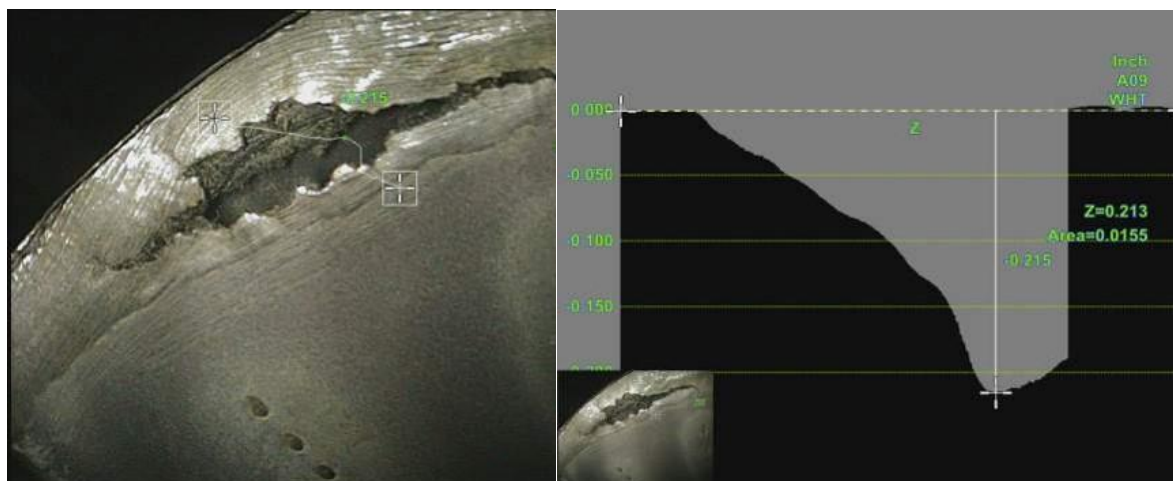
Slika 16. Primjer očitavanja prethodno definirane površine [15]



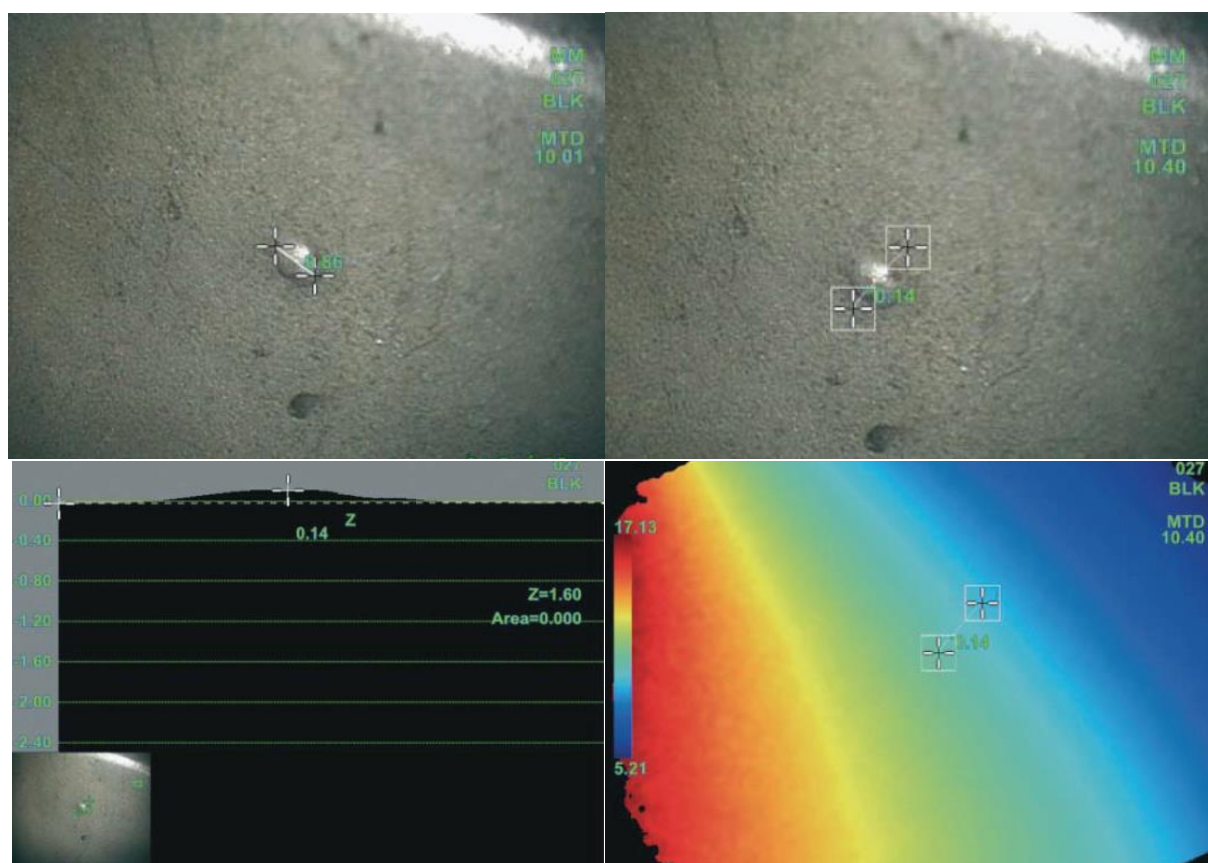
Slika 17. Primjer očitavanja dubine oštećenja, sa pripadajućom kartom određenih ravnina (*slices*) za različite dubine [15]



Slika 18. Primjer očitavanja oštećenja 'oblakom točaka', uz usporedbu sa neoštećenim 3D modelom ispitivanog objekta [15]



Slika 19. Primjer očitavanja dubine oštećenja turbinske lopatice i profilni prikaz mjere [15]



Slika 20. Primjer očitavanja lokalne nakupine materijala ('ekcem') na turbinskoj lopatici [15]

2.2 Pravilni odabir metode

U prethodnim poglavljima navedena je stereo metoda mjerenja, i metoda 3D faznog mjerenja, gdje obje metode imaju mogućnost dobivanja 3D rezultata, i koje se u suvremeno doba često koriste u NDT pregledu zrakoplova. Svaka od metoda ima svoje prednosti i nedostatke, a prije provođenja ispitivanja je potrebno pravilno odlučiti koja od metoda će dati najvjerodostojnije rezultate.

Bitni faktori koji utječu na izbor instrumenta imaju vezu sa odabirom odgovarajućeg distalnog završetka, prirode površine koja se ispituje, te vrsti rezultata koji je potrebno dobiti.

Odabir se ilustrativno može prikazati i kvalitativnim dijagramom:



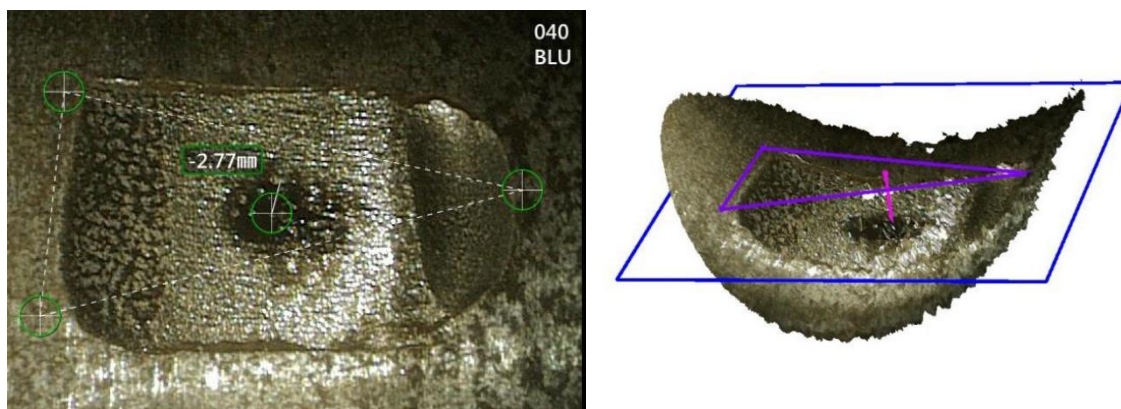
Slika 21 . Prikaz kvalitativnog odabira metode mjerenja u odnosu na uvjete [16]

2.3 Greške u 3D faznom mjerenju

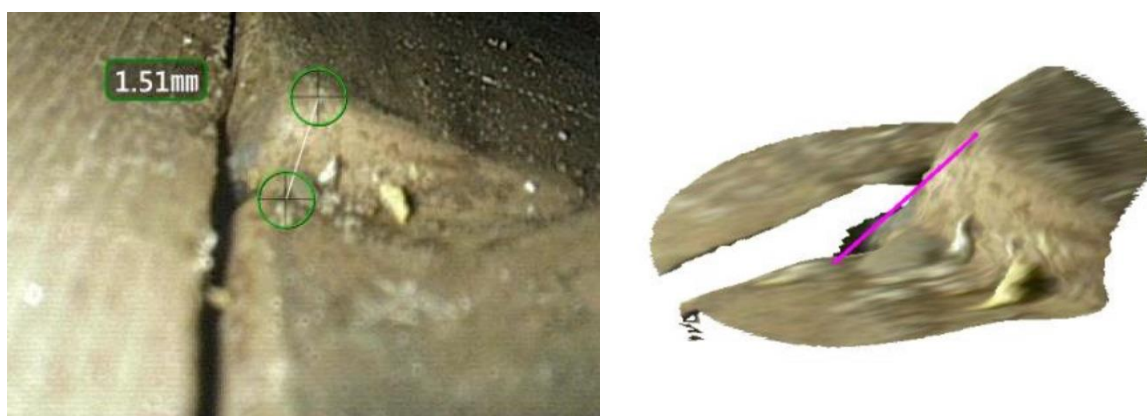
S obzirom na odabranu metodu mjerenja, mora se uzeti u obzir i prednost 3D faznog mjerenja, a to je mogućnost stvaranja 3D slike oštećenja pomoću 'oblaka točaka'. Osim što se tim prikazom dobiva bolji uvid u prirodu oštećenja, on također omogućuje ispitivaču provjeru kvalitete označavanja referentnih točaka, a pritom i pouzdanost izmjere [16].

Greške u kvalitetnom očitavanju mjera oštećenja se mogu u potpunosti previdjeti u 2D prikazu oštećenja, što je slučaj kod stereo metode mjerenja, dok u 3D prikazu greške postaju vidljive, i moguće ih je odmah ispraviti.

U sljedećim primjerima ilustriraju se moguće greške:



Slika 22. Očitavanje dubine oštećenja u odnosu na zadanu ravninu, dok je u 3D vidljivo da je oštećenje uleknuto [16]



Slika 23. Očitavanje dužine pod pretpostavkom da je označena najkraća udaljenost dvaju točaka, dok je u 3D prikazu vidljivo da je linija postavljena pod nekim kutem [16]

3. Istraživanje

Cilj ovog rada je analizirati mogućnosti NDT instrumenta GE XLG3 VideoProbe, koji koristi novu tehnologiju 3D faznog mjerenja, i usporedno prikazati rezultate mjerenja površinskih oštećenja na posebno obrađenim uzorcima mjernim povećalom, univerzalnim mjernim mikroskopom, instrumentom EVEREST VIT i računalnom tomografijom (CT).

Instrument GE XLG3 VideoProbe je Croatia Airlines d.d. nabavila u svrhu provođenja bržeg i kvalitetnijeg NDT ispitivanja komponenata zrakoplova koje održava. U suradnji sa Croatia Airlines NDT odjelom, osmišljeno je istraživanje na posebno izrađenim uzorcima, na kojima se provodi 3D fazno mjerenje oštećenja, te stereo metoda mjerenja instrumentom EVEREST VIT. Zatim se u sklopu Katedre za nerazorna ispitivanja, te Katedre za mjerenje i kontrolu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (dalje u tekstu: FSB), provode ispitivanja drugim NDT uređajima i metodama: vizualno ispitivanje – mjerno povećalo i univerzalni mjerni mikroskop, te ispitivanje računalnom tomografijom (CT – *Computed Tomography*).

Rezultati će u radu biti analizirani, komentirani i uspoređeni sa rezultatima ispitivanja GE XLG3 VideoProbe-om.

3.1 Uzorci

Predmeti ispitivanja su dvije aluminijske pločice debljine 6mm, koje su bile sastavni dio većeg dijela ramenjače zrakoplova Canadair CL-415. Uzorke je FSB-u ustupio Zrakoplovno tehnički centar u Velikoj Gorici [17].

Na uzorcima je dodatno izrađen niz umjetnih površinskih nepravilnosti – utora i ureza, koji simuliraju pukotinska i korozijska oštećenja materijala.

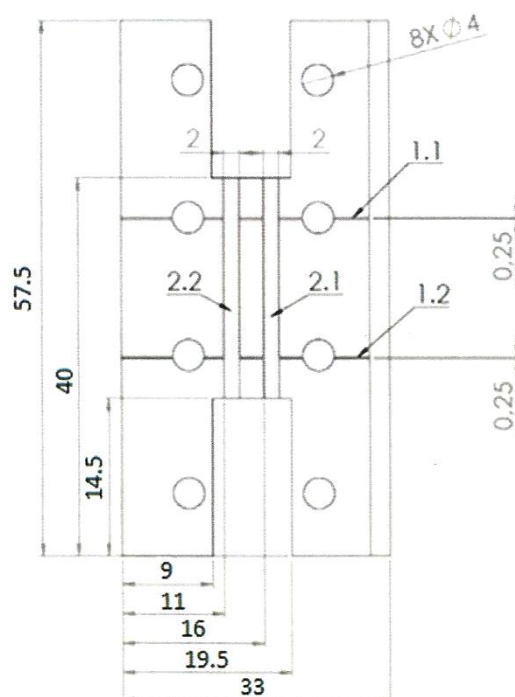
Na Uzorku 1 koji ima oblik slova 'H' (Slika x) nalazi se 8 provrta. Preko središnja 4 provrta prolaze dva umjetno izrađena utora koja simuliraju pukotinska oštećenja. Nastoji se simulirati kako su upravo provrti zakovičnih spojeva na ramenjači kritična mjesta za nastanak pukotina. Primarna degradacija materijala nastaje pod utjecajem korozije, stoga su napravljena dva utora po sredini uzorka. Slijedeća Tablica 1. prikazuje površinske i dubinske dimenzije navedenih oštećenja.

Na Uzorku 2 (slika 24.) su izrađena dva utora koji simuliraju veća oštećenja, poput korozije.

Tablica 1. prikazuje nazivne dimenzije navedenih oštećenja.

oznaka	oštećenje	površinske dimenzije	dubinske dimenzije
1.1	pukotina	0.25 [mm]	0.06 [mm]
1.2	pukotina	0.25 [mm]	0.12 [mm]
2.1	korozija	36 [mm ²]	0.06 [mm]
2.2	korozija	36 [mm ²]	0.12 [mm]

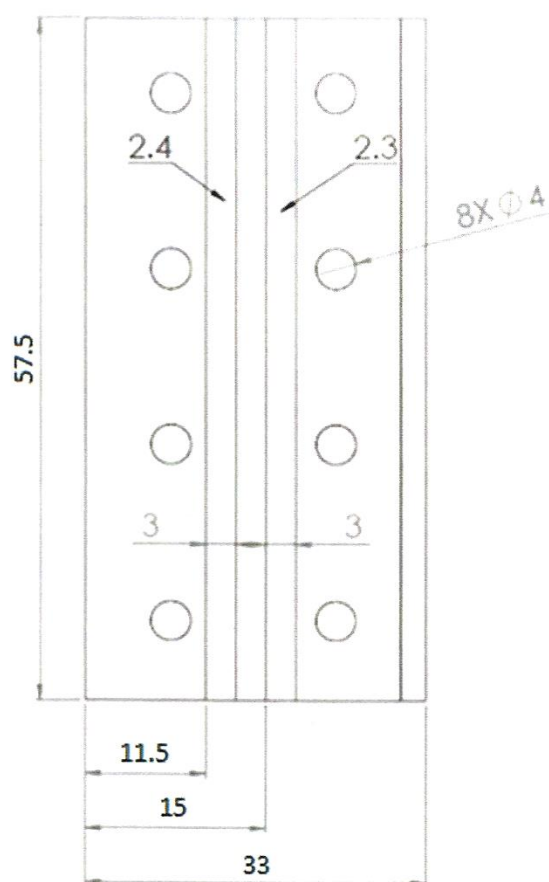
Tablica 1. Nazivne dimenzije simuliranih oštećenja na Uzorku 1 [17]



Slika 24. Ispitni Uzorak 1 [17]

oznaka	oštećenje	površinske dimenzije	dubinske dimenzije
2.3	korozija	174 [mm ²]	0.8 [mm]
2.4	korozija	174 [mm ²]	1.5 [mm]

Tablica 2. Nazivne dimenzije simuliranih oštećenja na Uzorku 2 [17]



Slika 25. Ispitni Uzorak 2 [17]



UZORAK 1

UZORAK 2

Slika 26. Uzorci nakon obrade

Ispitan je i kemijski sastav uzoraka, sa koncentracijom na oštećenjima, da se dobije točan uvid u materijal. Ispitivanje je provedeno spektrometrijskim ispitivanjem X-zrakama uređajem Olympus InnovX. U slijedećoj Tablici 3. je naveden sastav materijala uzoraka.

kemijski element u % uzorak	Al	Mg	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Zr	Pb
UZ 1.	91.31	2.47	3.06	0.17	0.73	0.3	4.47	0.078	0.005	0.005
UZ 2.	88.42	2.85	3.08	0.19	0.61	0.28	4.63	0.045	0.003	0.006

Tablica 3. Kemijski sastav materijala Uzoraka 1 i 2

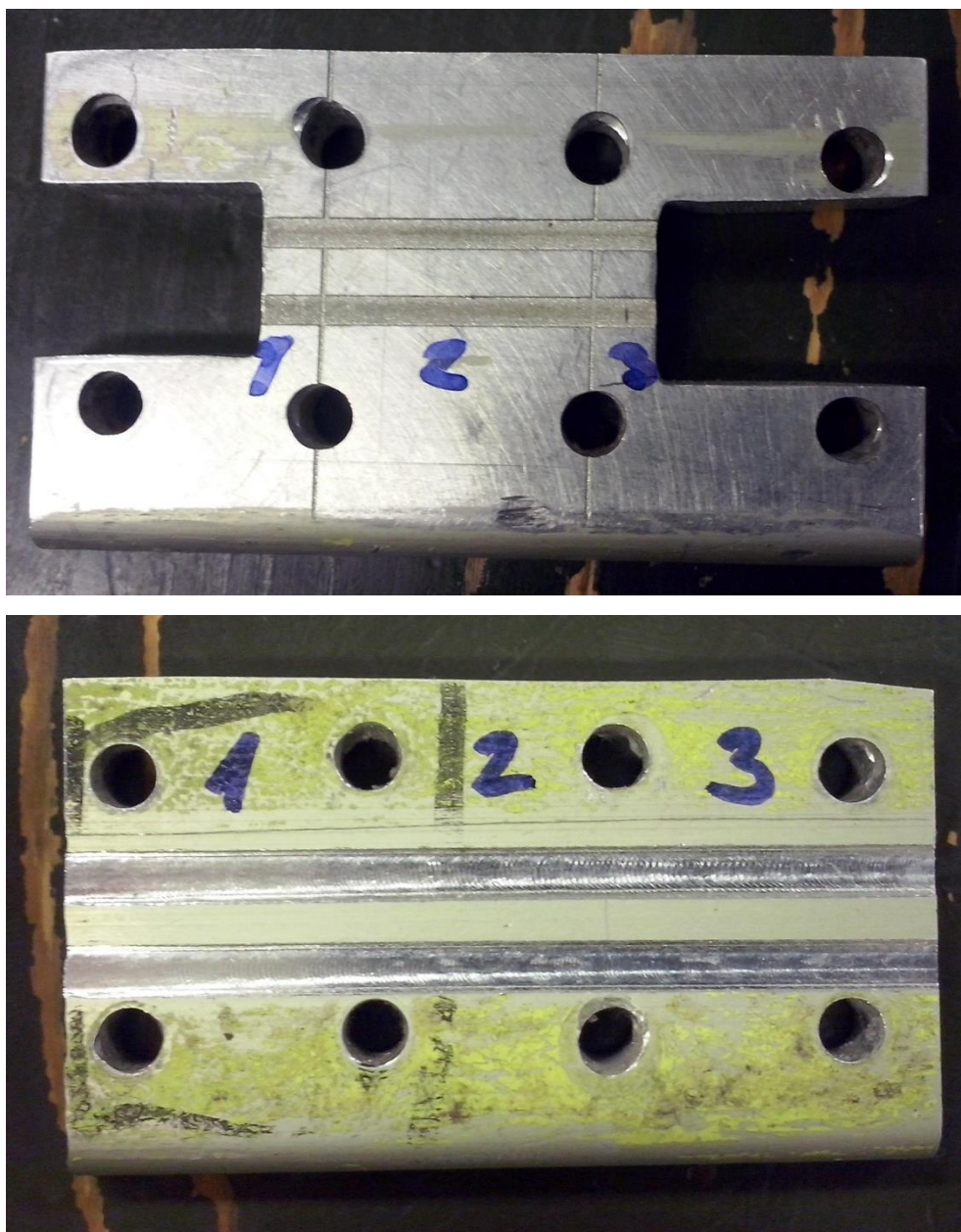
3.2. Ispitna područja

Tanji utori na uzorcima su napravljeni obradom EDM (*Electrical discharge machining*) postupkom, a veći utori su napravljeni postupkom glodanja. Rezultat ove obrade su neravnomjerno stvorene pukotine, sa varijabilnom dubinom, površinom i kvalitetom linija, što predstavlja idealnu podlogu za ispitna područja različitim NDT metodama i instrumentima u svrhu definiranja njihove preciznosti i pouzdanosti.

Prema mogućnostima i načinu primjene korištenih uređaja i metoda za ovo istraživanje, odabrana su slijedeća područja ispitivanja uzoraka, prikazana na Slikama 27, 28.



Slika 27. Uzorci 1 i 2 sa oznakama područja a, b, c na kojima se provodi dio ispitivanja (mjerno povećalo, 3D fazno mjerenje, stereo metoda mjerenja, računalna tomografija)



Slika 28. Uzorci 1 i 2 sa oznakama područja na kojima se provodi dio ispitivanja (univerzalni mjerni mikroskop)

3.3. Ispitivanja i rezultati

3.3.1 Ispitivanje povećalom

U svrhu preliminarnog očitavanja vrijednosti širine i dubine pukotina u prethodno naznačenim područjima (Slika 27.), koristilo se mjerno povećalo Carton scale loupe 7x. Ovom metodom nije moguće očitati dubinu oštećenja, nego samo širinu, dužinu i radijus ispitivanog oštećenja. Preciznost ove metode dosta ovisi o osvjetljenju, pristupačnosti ispitivanoj komponenti, kvaliteti i boji površine, te iskustvu ispitivača.

Na Katedri za nerazorna ispitivanja, FSB-a su na uzorcima 1 i 2 (očitanje slijedeće vrijednosti dimenzija širina oštećenja, navedene u Tablici 4.

<i>mjerno povećalo</i>	UZORAK 1-a	UZORAK 1-b	UZORAK 2-c
širina (mm)	2	0.3	3.5

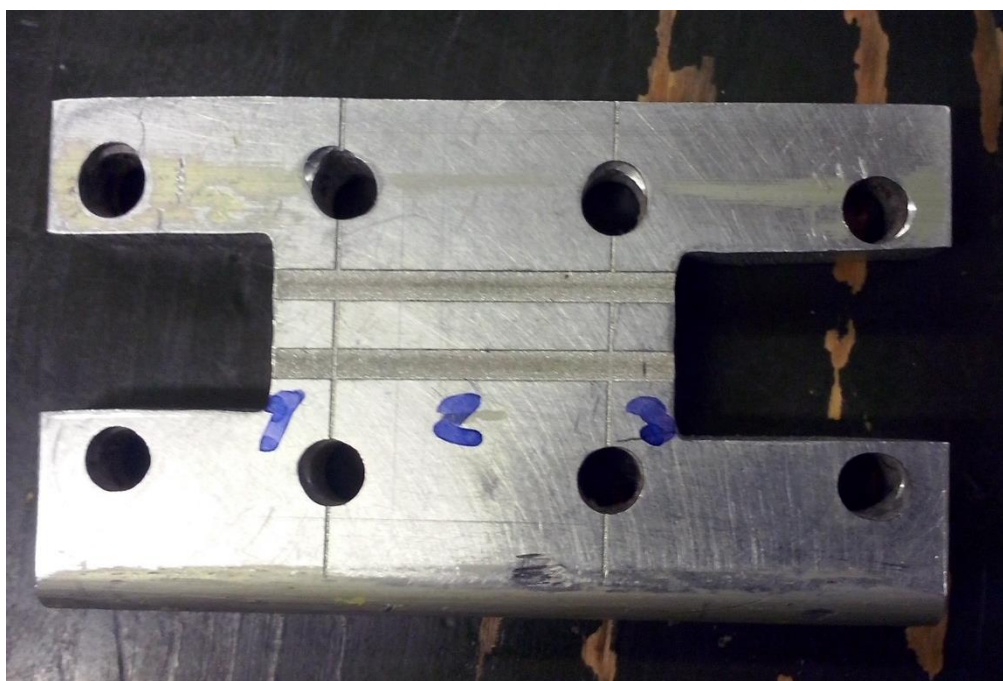
Tablica 4. Dimenzije širina oštećenja na uzorcima 1 i 2



Slika 29. Očitavanje dimenzije širina oštećenja Carton scale povećalom

3.3.2 Ispitivanje mjernim mikroskopom

Na Zavodu za mjerenje i kvalitetu FSB-a, korišten je Univerzalni mjerni mikroskop 200x (oznaka MU1-126) za očitavanje širine oštećenja. Uzorci su označeni na Slikama 30 i 31, a mjerenje je ostvareno u programu RLS MerOpt. Za Uzorak 1, definirana su tri mjesta mjerenja širine većeg utora, 1-2-3, te uz oznake 1 i 3 pripadajući tanji utori, 1.1 i 3.1. Uzorak 2 je također označen i očitao na tri mjesta, kako je prikazano na Slici 31, a dimenzije oba uzorka su prikazane u Tablicama 5 i 6.



Slika 30. Uzorak 1 i oznake za mjesta očitavanja širine utora - oštećenja mikroskopom

UZORAK 1	1	1.1	2	3	3.1
gornji kanal (mm)	2.05	/	2.07	2.05	/
donji kanal (mm)	2.04	0.38	2.01	2.06	0.34

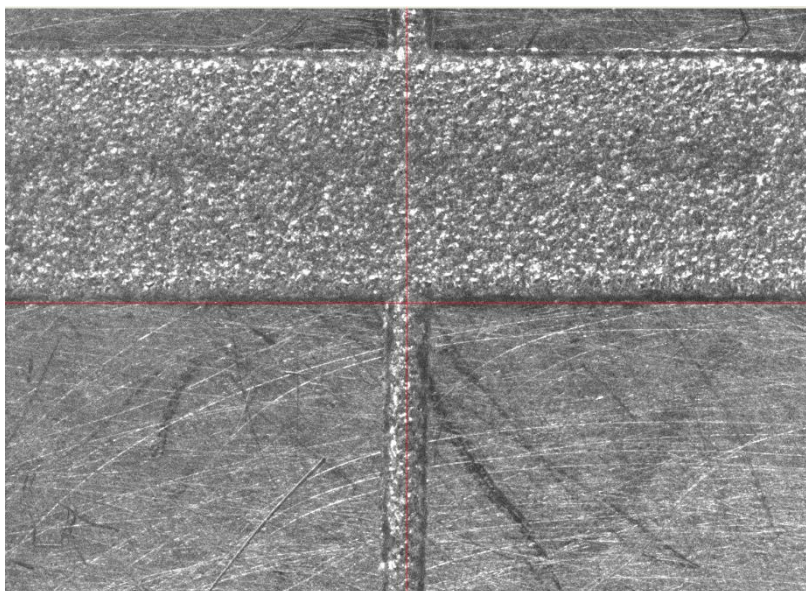
Tablica 5. Izmjerene dimenzije oštećenja za Uzorak 1



Slika 31. Uzorak 2 i oznake za mjesta očitavanja širine utora - oštećenja mikroskopom

UZORAK 2	1	2	3
gornji kanal (mm)	3.48	3.55	3.61
donji kanal (mm)	3.52	3.50	3.43

Tablica 6. Izmjerene dimenzije oštećenja za Uzorak 2



Slika 32. Prikaz postupka očitavanja mjera sa Uzorka 1 u programu RLS MerOpt

3.3.3 RVI – metoda 3D faznog mjerenja i stereo mjerenja

Za ovo ispitivanje su u dogovoru sa Croatia Airlines NDT odjelom bili su ustupljeni uređaji GE XLG3 VideoProbe i Everest VIT. U suradnji sa Croatia Airlines d.d. NDT ispitivačima, na Uzorcima 1 i 2 bilo je provedeno ispitivanje dimenzija oštećenja, metodom 3D faznog mjerenja i stereo mjerenja. Od strane Croatia Airlines d.d. ustupljen je i dio oštećenog statora iz mlaznog motora, te je i na njemu provedeno ispitivanje pukotine 3D faznim mjerenjem.

Za 3D fazno mjerenje je korišten distalni završetak Black FOV*-105, DOF** 8-250 [mm], a za stereo mjerenje distalni završetak BLK FWD (Black Forward) 708, ravan [mm].

Postupak pripreme uređaja GE XLG3 VideoProbe prije samog mjerenja je sadržavao:

1. kalibriranje
2. osiguravanje zadovoljavajućeg indeksa kvalitete mjerenja za uređaj
3. stvaranje kvalitetne slike objekta na kojem će se provesti mjerenje (uvjet je 2 sekunde mirovanja objekta)

U izborniku uređaja se, nakon dobivanja kvalitetne slike objekta na kojem se provodi mjerenje, odabire metoda mjerenja – *3D phase measurement – depth i – point line*, čime se definira mjerenje dubine odabranog oštećenja. Dubina oštećenja se uvijek bira u odnosu na najdublju brazdu oštećenja iz topografske slike.

Postupak – *point line* - uključuje odabir dvije točke koje definiraju 'liniju interesa' iznad mjerenog oštećenja, te uređaj mjeri profil dubine u odnosu na zadanu liniju. Rezultat je relativna dubina, te se 'linija interesa' može u izborniku uređaja pomicati prema želji ispitivača dok nije okomita za ostvarivanje što preciznijeg očitavanja dimenzija. Grešku u ovoj metodi može uzrokovati priroda oštećenja, jer u slučaju da na naoko neoštećenom dijelu komponente nedostaje materijala, točno postavljanje referentnih točaka može bit zahtjevnije, i to se mora provjeravati.

*FOV – Field of View

** DOF – Depth of Field

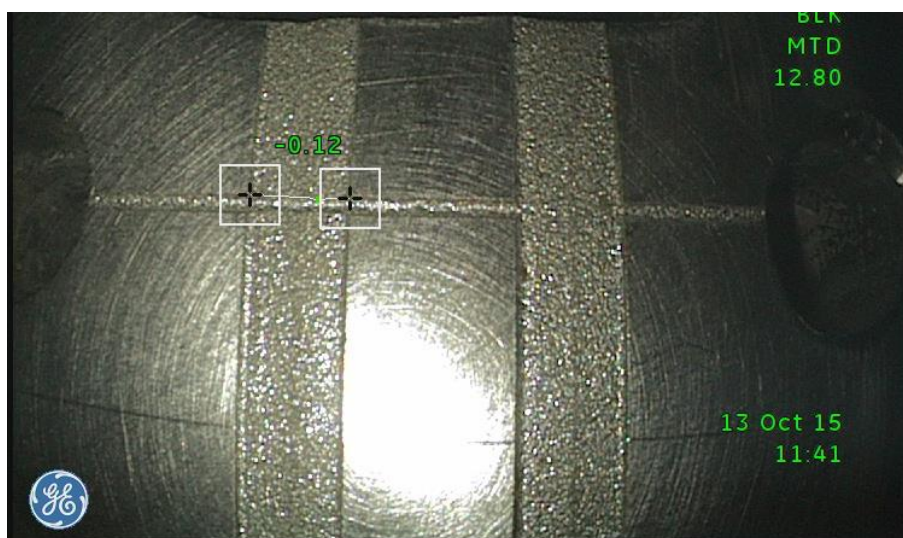
Nakon definiranja dvije referentne točke za 'liniju interesa', postavlja se i treća točka na samo područje oštećenja, te se za odabranu točku dobiva vrijednost dubine. Obradom nastalog očitavanja na uređaju vidljiv je i topografski prikaz oštećenja, te se treća točka može naknadno pomicati za dodatna očitavanja dubine oštećenja, ukoliko ona nije uniformna.

Postupak – *depth* - podrazumijeva odabir tri proizvoljne točke koje čine ravninu, te četvrte točke koja očitava dubinu oštećenja. Bitno je da linija spoja ravnine sa točkom na kojoj se očitava dubina zadovoljava uvjet okomitosti za što preciznije rezultate.

Za stereo mjerenje uređajem Everest VIT, ispitan je Uzorak 2, te je na Slici 42. prikazano koliko je područje ispitivanja manje radi dvostruke slike koja uvjetuje manje vidno polje. U desnu sliku se zadaju tri točke za definiranje referentne ravnine, te se na lijevoj slici dobiva očitavanje dubine profila ispod te linije. Ova metoda ne može prikazati topografski profil dubine, ali distalni završetak ne zahtijeva sto postotnu okomitost na površinu prilikom mjerenja.

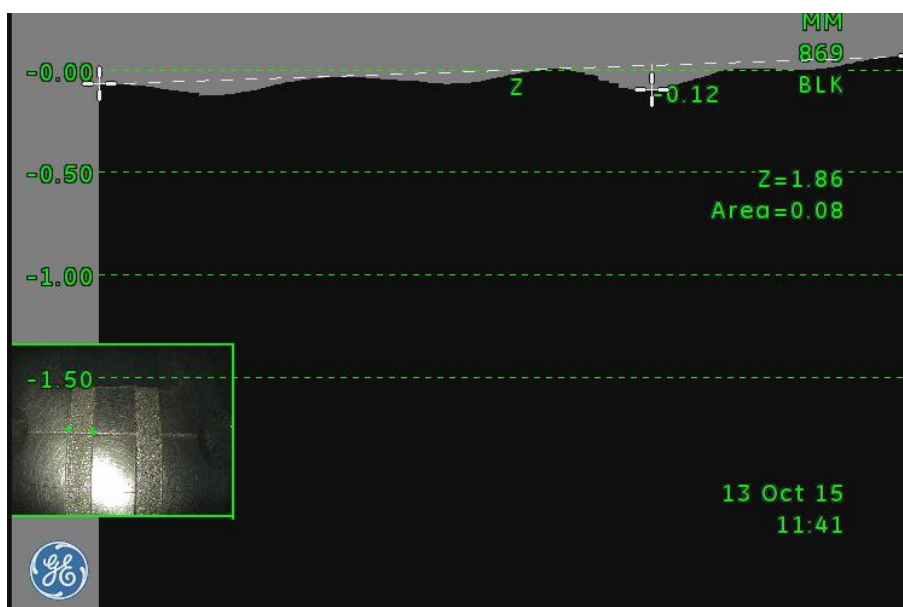
Slijedeće slike su prikazi postupka mjerenja i očitavanja na Uzorcima 1 i 2, te na dijelu statora.

UZORAK
1-a



3D fazno
mjerjenje

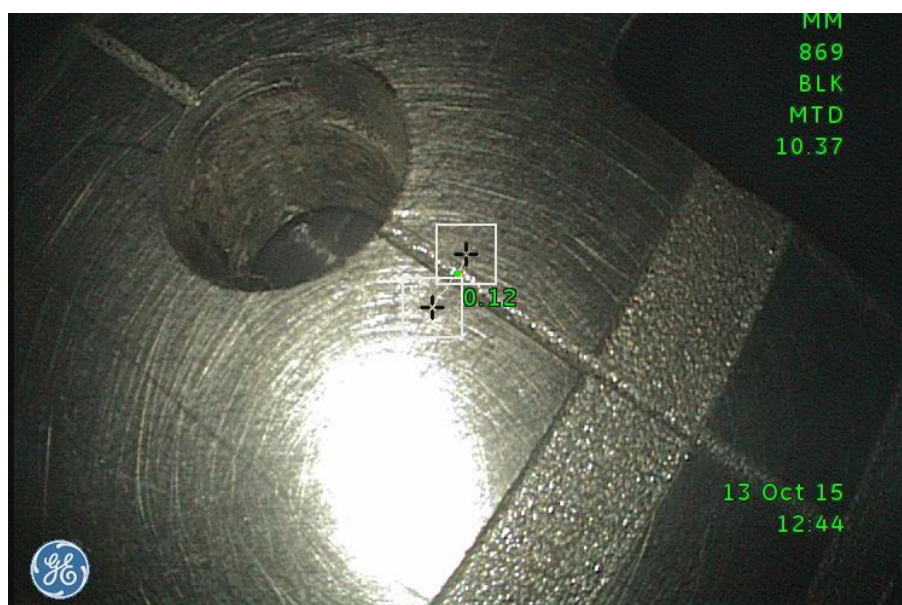
Slika 33. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]



3D fazno
mjerjenje

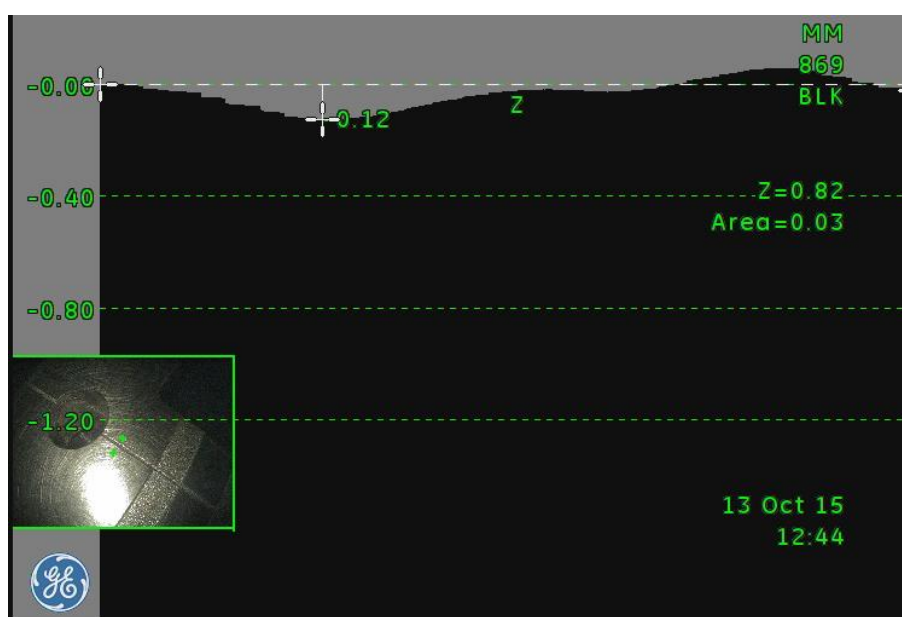
Slika 34. Prikaz profila dubine za – point line očitavanje, [mm]

UZORAK
1-b



Slika 35. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]

3D fazno
mjerjenje

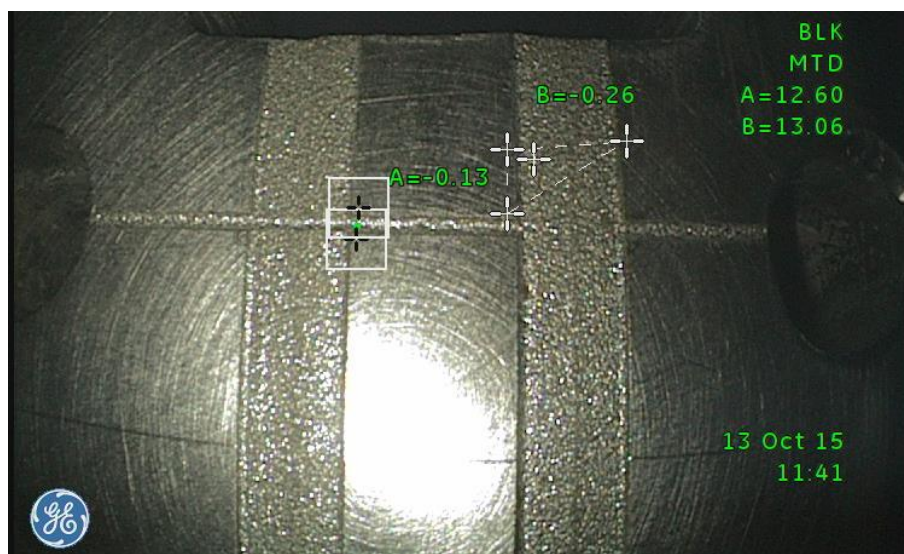


Slika 36. Prikaz profila dubine za – point line očitavanje, [mm]

3D fazno
mjerjenje

UZORAK

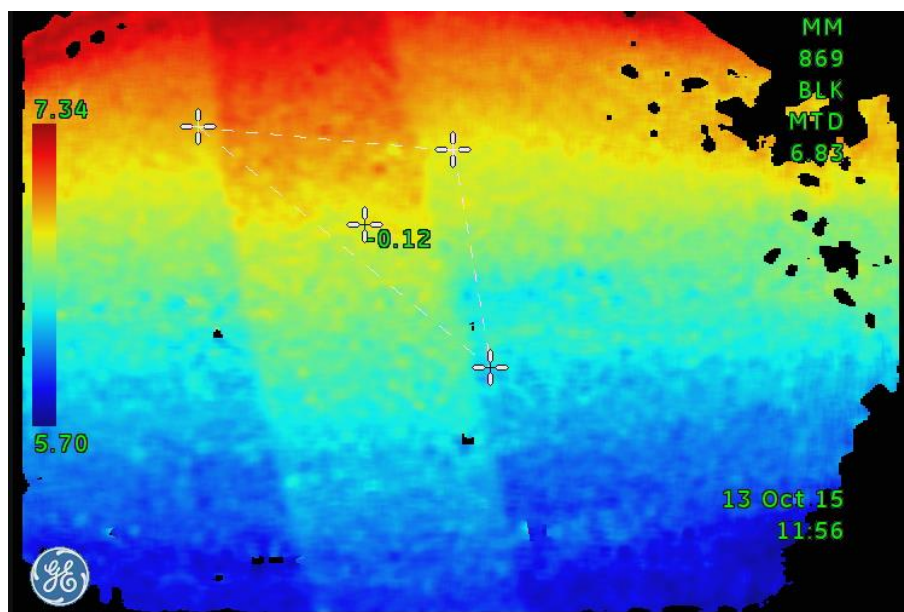
1 - a

3D fazno
mjerjenje

Slika 37. Očitavanje dubine oštećenja – depth, [mm]

UZORAK

1-a

3D fazno
mjerjenje

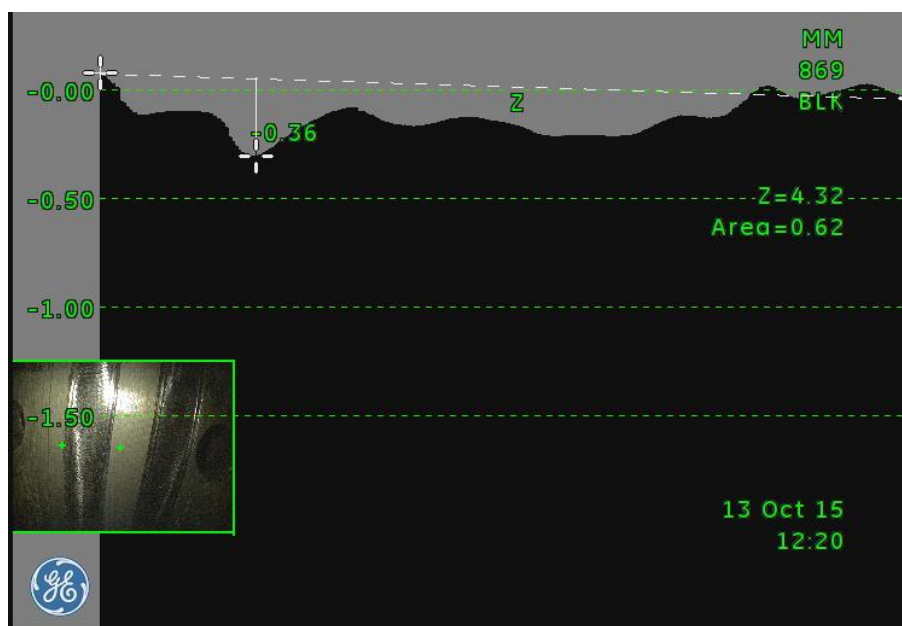
Slika 38. Prikaz karte područja različitih dubina, -depth, [mm]

UZORAK

2 - c

3D fazno
mjerjenje

Slika 39. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]

3D fazno
mjerjenje

Slika 40. Prikaz profila dubine za – point line očitavanje, [mm]

UZORAK

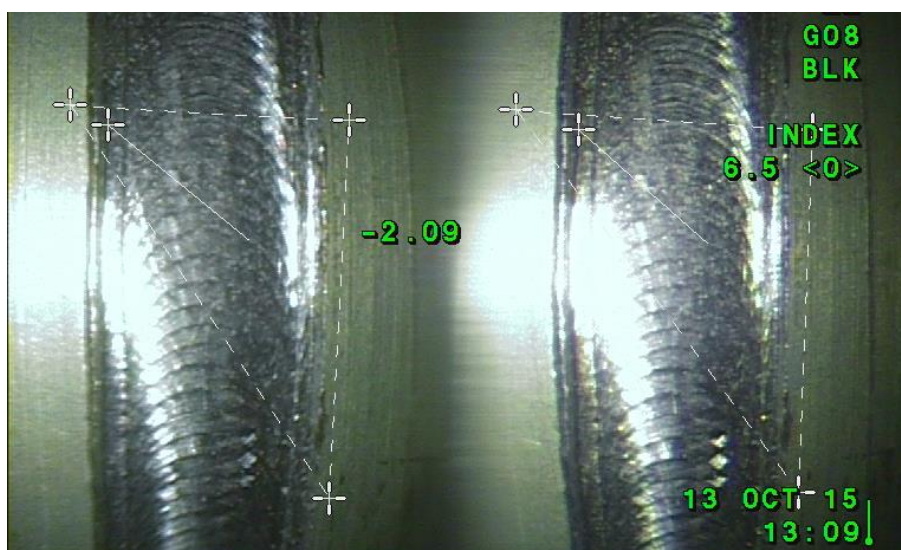
2 -c

3D fazno
mjerjenje

Slika 41. Očitavanje dubine oštećenja – point line, [mm]

UZORAK

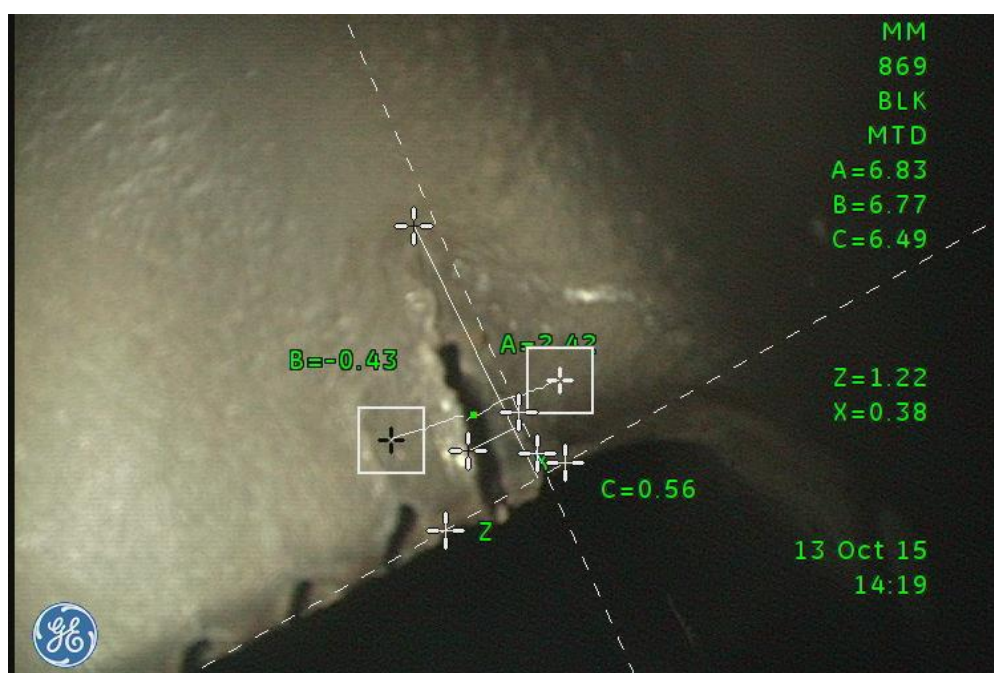
2 -c

Stereo
mjerjenjeSlika 42. Očitavanje dubine stereo mjerenjem, [μm]

STATOR

3D fazno
mjerjenje

Slika 43. Očitavanje dužine pukotine, - point line, [mm]

3D fazno
mjerjenje

Slika 44. Očitavanje dužine, širine i dubine pukotine, - point line, [mm]




U skladu sa obavljenim mjerenjima, na više mjesta unutar naznačenih područja (Slika 27.) očitane su slijedeće dimenzije oštećenja, Tablica 7.

	<i>širina (mm)</i>	<i>dubina (mm)</i>	<i>dubina (stereo) (mm)</i>	<i>dužina(mm)</i>
UZORAK 1 - a				
<i>mjerenje 1</i>	2.4	-0.12	/	/
<i>mjerenje 2</i>	2.04	-0.12	/	/
<i>mjerenje 3</i>		-0.14	/	/
<i>mjerenje 4</i>		-0.19	/	/
<i>mjerenje 5</i>		-0.18	/	/
UZORAK 1 - b				
<i>mjerenje 1</i>	0.42	-0.13	/	/
<i>mjerenje 2</i>		-0.12	/	/
UZORAK 2 - c				
<i>mjerenje 1</i>	3.53	-0.36	-0.209	
<i>mjerenje 2</i>	3.61	-0.23	/	/
STATOR				
<i>mjerenje 1</i>	0.56	-0.43		2.42

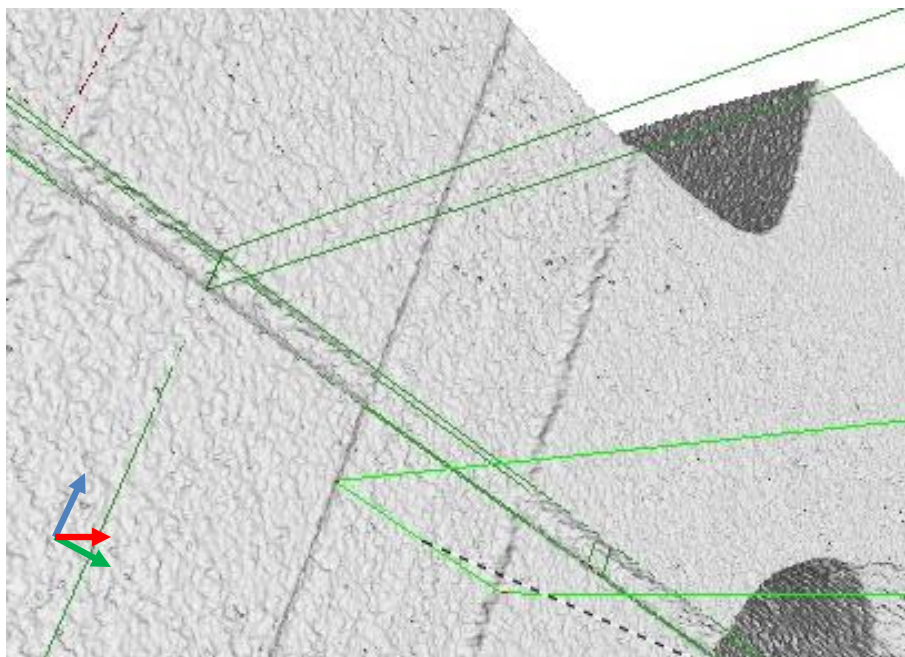
Tablica 7. Očitane dimenzije oštećenja 3D faznim i stereo mjerenjem

3.3.4 Metoda računalne tomografije

Na Zavodu za kvalitetu FSB-a, u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina, obavljeno je snimanje Uzorka 1, na rendgenskom uređaju XTH225 – Nikon. Parametar za postavku snimanja je debljina. Nakon snimanja je obavljena rekonstrukcija volumena i čišćenje slike od šumova raspršenih X-zraka. Očitana slika se zatim obradila u programu Volume Graphics myVGL 2.2, te su se odabrala područja za očitavanje dimenzija širine i dubine oštećenja, što je prikazano na slijedećim izabranim Slikama (45 – 50).

X 
Y 
Z 

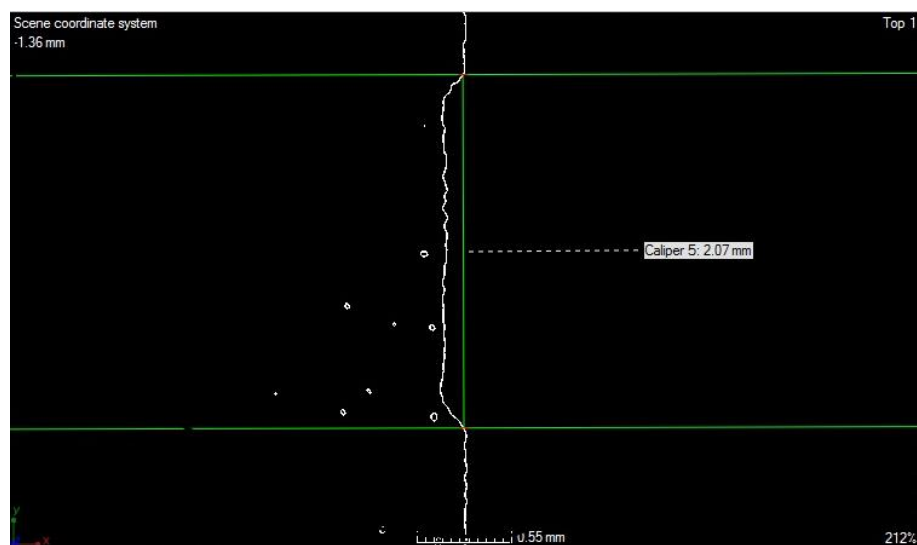
UZORAK 1



Slika 45. Prikaz rendgenske snimke uzorka i označavanja oštećenja prije očitavanja

UZORAK

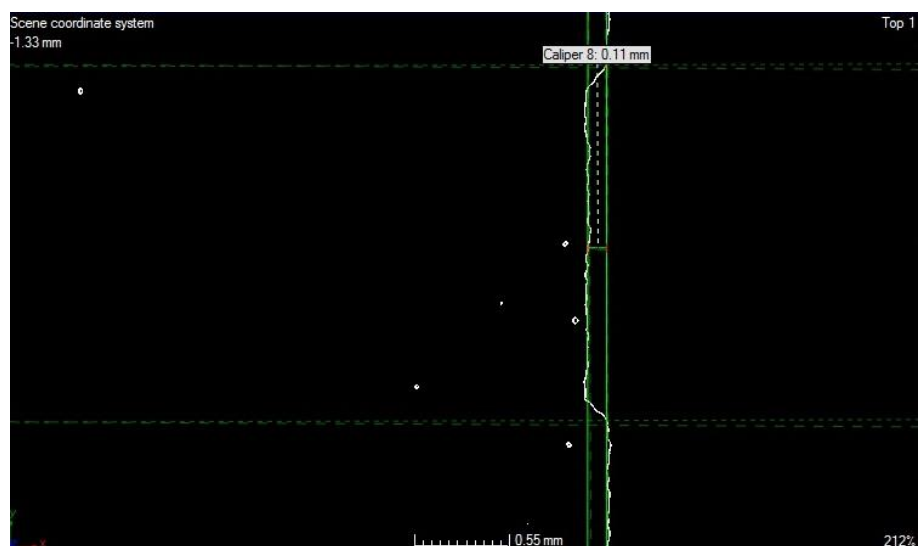
1 – a



Slika 46. Očitavanje širine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]

UZORAK

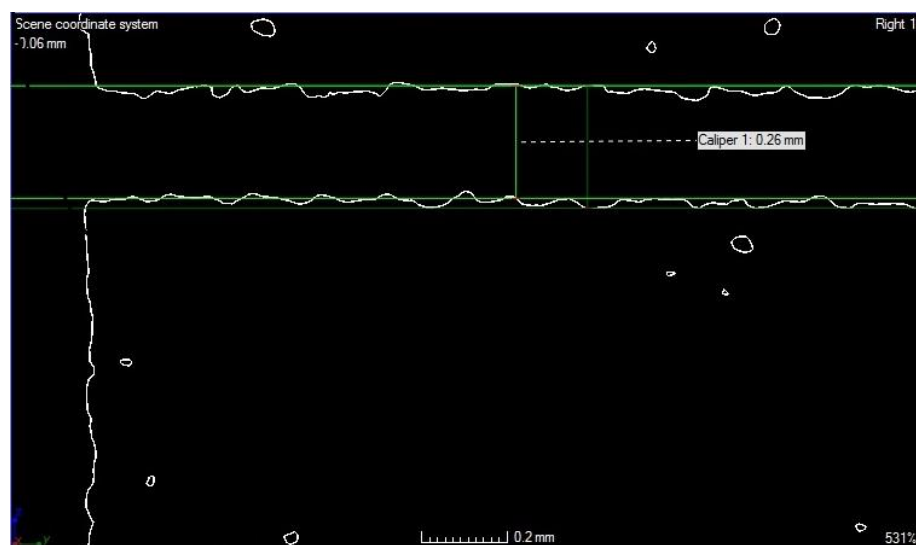
1 – a



Slika 47. Očitavanje dubine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]

UZORAK

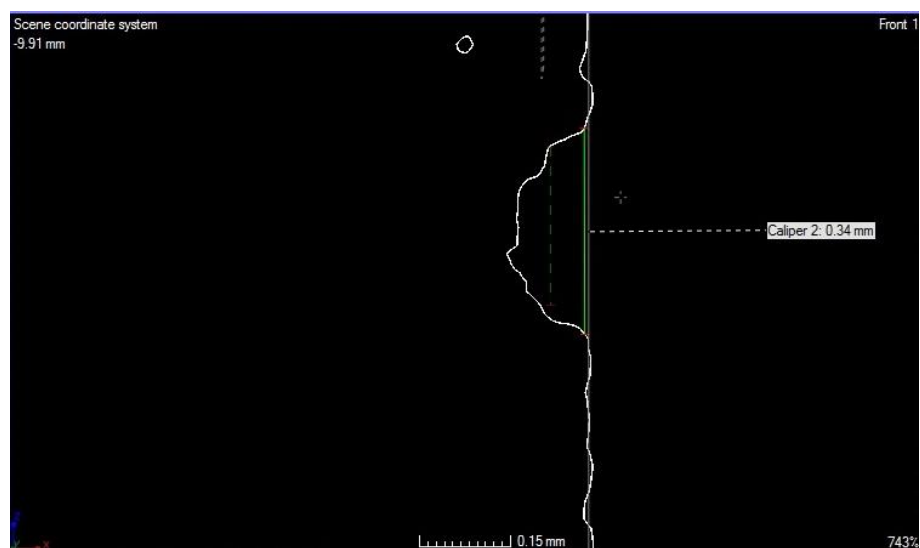
1 – b



Slika 48. Očitavanje širine oštećenja iz Y-Z ravnine, [mm]

UZORAK

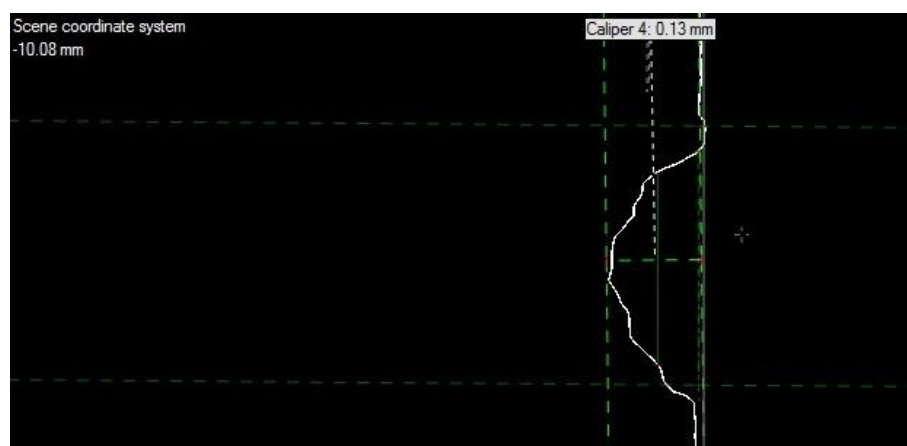
1 – b



Slika 49. Očitavanje širine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]

UZORAK

1 – b



Slika 50. Očitavanje dubine oštećenja iz X-Y ravnine, [mm]

UZORAK 1-a	širina (mm)	dubina (mm)
mjerenje 1	2.07	0.11
mjerenje 2	2.08	0.10
UZORAK 1-b		
mjerenje 1	0.26	0.13
mjerenje 2	0.29	0.13
mjerenje 3	0.34	/
mjerenje 4	0.36	/

Tablica 8. Očitane dimenzije oštećenja na više mjesta, na Uzorku 1, korištenjem rendgenske metode

Iz Tablice 8. vidljivo je odstupanje u jednom očitavanju širine: 0.26mm, naspram zadnjeg očitavanja: 0.36mm (vrijednosti označene crvenom bojom). Razlog tome je odabrana ravnina iz koje se radilo prvo očitavanje dimenzija, a to je Y-Z ravnina (Slika 48.), što je naknadno ispravljeno prebacivanjem na pogled iz X-Y ravnine (Slika 49.), gdje je bila očita pogreška inicijalnog postavljanja ravnine očitavanja na njegove rubove, a ne u unutrašnjost oštećenja. Dubina oštećenja je odabirana u odnosu na najdublju brazdu oštećenja.

4. Analiza rezultata

Za potrebe analize, usporedbe i interpretacije ispitivanja, svi rezultati su prikazani u Tablicama 9 do 12.

UZORAK 1-a	mjerno povećalo	univerzalni mjerni mikroskop	XLG3 VideoProbe	računalna tomografija
<i>širina (mm)</i>				
<i>mjerenje 1</i>	2	2.04	2.4	2.07
<i>mjerenje 2</i>	/	/	2.04	2.08
<i>dubina (mm)</i>				
<i>mjerenje 1</i>	/	/	-0.12	0.11
<i>mjerenje 2</i>	/	/	-0.12	0.10
<i>mjerenje 3</i>	/	/	-0.14	/
<i>mjerenje 4</i>	/	/	-0.19	/
<i>mjerenje 5</i>	/	/	-0.18	/

Tablica 9. Prikaz rezultata mjerenja na Uzorku 1-a

UZORAK 1 - b	mjerno povećalo	univerzalni mjerni mikroskop	XLG3 VideoProbe	računalna tomografija
<i>širina (mm)</i>				
<i>mjerenje 1</i>	0.3	0.38	0.42	0.26
<i>mjerenje 2</i>	/	/	/	0.29
<i>mjerenje 3</i>	/	/	/	0.34
<i>mjerenje 4</i>	/	/	/	0.36
<i>dubina (mm)</i>				
<i>mjerenje 1</i>	/	/	-0.13	-0.13
<i>mjerenje 2</i>	/	/	-0.12	-0.13

Tablica 10. Prikaz rezultata mjerenja na Uzorku 1-b

UZORAK 2 - c	mjerno povećalo	univerzalni mjerni mikroskop	XLG3 VideoProbe	EVEREST VIT	računalna tomografija
<i>širina (mm)</i>					
<i>mjerenje 1</i>	3.5	3.55	3.53	/	N.A.
<i>mjerenje 2</i>	/	/	3.61	/	N.A.
<i>dubina (mm)</i>					
<i>mjerenje 1</i>	/	/	-0.36	-0.209	N.A.
<i>mjerenje 2</i>	/	/	-0.23	/	N.A.

*N.A. Nije analizirano iz tehničkih razloga

Tablica 11. Prikaz rezultata mjerenja na Uzorku 2-c

STATOR	XLG3 VideoProbe
<i>širina (mm)</i>	0.56
<i>dubina (mm)</i>	-0.43
<i>dužina (mm)</i>	2.42

Tablica 12. Prikaz rezultata mjerenja na statoru

U Tablicama 9-12 vidljiv je presjek rezultata svih ispitivanja provedenih za ovaj rad. Svrha provedbe ispitivanja je usporedba efikasnosti mjerenja instrumentom GE XLG3 sa drugim ispitnim NDT metodama mjerenja značajki oštećenja na umjetno izrađenim oštećenjima na uzorcima, i na realnom oštećenju statora iz eksploatacije zrakoplova instrumentom GE XLG3 VideoProbe, u uvjetima stvarne provedbe ispitivanja tokom održavanja zrakoplova u hangaru. U ovom ispitivanju praćeno je osnovno pravilo u NDT ispitnim metodama razlikovanja ponovljivosti i obnovljivost rezultata.

Korištena metodologija je uključivala pojam obnovljivosti, svojstven NDT ispitnim metodama, koji podrazumijeva mjernu preciznost pod različitim mjernim uvjetima, za razliku od ponovljivosti koja podrazumijeva usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima.

Kao što je bilo za pretpostaviti, ispitivanje značajki oštećenja mjernim povećalom dalo je okvirne vrijednosti mjera, te se ta metoda najčešće pri pregledu zrakoplovnih konstrukcija koristi kao preliminarni pregled oštećenja.

S druge strane, ispitivanje univerzalnim mjernim mikroskopom dalo je izrazito precizna očitavanja značajki, no kod održavanja zrakoplova u obzir se svakako moraju uzeti dimenzije i geometrija pojedinih dijelova zrakoplova, npr. spremnici goriva smješteni unutar krila, na kojima je jednostavno nemoguće provesti ovu metodu mjernog ispitivanja.

Kod ispitivanja računalnom tomografijom, skoro su jednaki preduvjeti za podobne dijelove kao i za univerzalni mjerni mikroskop – zbog dimenzija i geometrije mnogi dijelovi zrakoplova nisu u mogućnosti stati u kabinu CT uređaja za provedbu snimanja. Tako se i u mojem istraživanju, zbog dimenzija i geometrije stator nije mogao ispitati mjerenjem računalnom tomografijom. Također, kod očitavanja značajki računalnom tomografijom, potrebna je edukacija i vještina ispitivača, jer kao što je i u Tablici 8. crveno označeno, mjere mogu biti krivo očitane slučajnim, ili nestručnim upravljanjem unutar računalnog programa.

Rezultati ispitivanjem GE XLG3 VideoProbe-om i EVEREST VIT, ne razlikuju se značajno od rezultata drugih metoda, a u slučaju sumnje ispitivača u preciznost rezultata instrumenta GE XLG3 VideoProbe, može se provesti provjera putem pouzdanog prikaza oštećenja 3D 'oblakom točaka'.

5. Zaključak

Svrha provedbe mjernih ispitivanja u ovom radu je bila analizirati mogućnosti NDT instrumenta GE XLG3 VideoProbe, koji koristi novu tehnologiju 3D faznog mjerenja, i usporedno prikazati rezultate mjerenja površinskih oštećenja na posebno obrađenim uzorcima mjernim povećalom, univerzalnim mjernim mikroskopom, instrumentom EVEREST VIT i računalnom tomografijom (CT). S obzirom da je pojam obnovljivosti rezultata uvijek prisutan u svim NDT ispitnim metodama, tako se pristupilo i ovom ispitivanju, te obradi i interpretaciji rezultata.

Prema analiziranim rezultatima, pouzdano se može zaključiti da u odnosu na laboratorijske uređaje i metode mjernog ispitivanja visoke preciznosti, rezultati 3D faznog mjerenja uređajem GE XLG3 VideoProbe-om nisu značajno odstupali. Rezultati pokazuju:

- (a) vrijednosti mjera dubine oštećenja očitane GE XLG3 VideoProbe-om razlikuju se od vrijednosti dubine oštećenja očitanih računalnom tomografijom za $|\pm 0.003 - 0.005 \text{ mm}|$, tj. za $\sim 4\%$ (ovisno o uzorku)
- (b) vrijednosti mjera širine oštećenja očitane GE XLG3 VideoProbe-om razlikuju se od vrijednosti širine oštećenja očitanih univerzalnim mjernim mikroskopom za $|\pm 0.005 - 0.0225 \text{ mm}|$, tj. za $\sim 7\%$ (ovisno o uzorku)
- (c) Očitavanje mjere dubine oštećenja stereo metodom mjerenja uređajem EVEREST VIT se razlikuje od očitane vrijednosti dubine oštećenja GE XLG3 VideoProbe-om za $|0.086 \text{ mm}|$, tj. za $\sim 30\%$, no područje ispitivanja stereo metodom mjerenja je vidljivo manje, te radi zahtjevnosti uvjetuje više očitavanja, što osjetno produljuje vrijeme ispitivanja tom metodom u odnosu na metodu 3D faznog mjerenja.

Također, korištenjem prikaza 3D slike oštećenja pomoću 'oblaka točaka', svojstvenog upravo metodi 3D faznog mjerenja, u suvremenom održavanju zrakoplova pomoću videoscopa ove vrste mogu se ostvariti izrazito precizna i pouzdana očitavanja značajki oštećenja, što rezultira sve kvalitetnijim i uspješnijim pregledima u kraćem vremenu.

6. LITERATURA

- [1] <http://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/031/031.htm>
- [2] A.Fahr; W. Wallace; Aeronautical applications of non-destructive testing; DEStech Publications; 2014.
- [3] C. Drury; Good practices in visual inspection; Applied Ergonomics Group Inc.; 2002
- [4] T. Luthi; Non-Destructive Evaluation Methods; Empa Centre; 2013.
- [5] http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/fiberscopes
- [6] Advances in three dimensional measurement in remote visual inspection; E Hubben, D.Jervis; 18th World conference in non-destructive testing, April 2012.
- [7] Optical Triangulation-Based Microtopographic Inspection of Surfaces; M. Costa; Sensors, 2012.
- [8] http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/GEIT-65015EN_measurement.pdf
- [9] <http://www.remotevisualinspection.org/2009/09/28/shadow-probe-measurement-method-for-video-borescope-measurements/>
- [10] Z. Korczewski; Analysing the potential for application of the phase shift method in endoscopic examination of marine engines; Polish Maritime Research, Vol 20; 2013.
- [11] G.Porter; Shadow technique improves measurement of micro holes; NIST, 2005.
- [12] United States Patent No.: US 7,821,649 B2.
- [13] http://www.ge-mcs.com/download/RVI/XLG3/GEIT-65042EN_xlg3-brochure.pdf
- [14] <http://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-3/Young-s-Experiment>
- [15] E.Hubben; 3D Phase Measurement; GE, 2015.
- [16] C. Bendall; Advances in 3D Remote Visual Control; GE, 2015.
- [17] I. Badurina-Žakan; Usporedba konvencionalne i računalne radiografije kod ispitivanja ramenjača krila zrakoplova; 2016.